



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERIA INDUSTRIAL

**PROYECTO FIN DE CARRERA: EFECTO DE LAS CENIZAS
VOLANTES Y DEL SUPERPLASTIFICADOR EN EL PROCESO
DE FRAGUADO DEL MORTERO AUTOCOMPACTANTE.**



Autor: Fernando López Nieto
Tutora: María Asunción Bautista Arija



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
GLOSARIO.....	8
CAPÍTULO 1: RESUMEN.....	9
CAPTULO 2: INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS.....	11
CAPÍTULO 4: ANTECEDENTES.....	12
4.1. HORMIGÓN Y MORTERO.....	12
4.1.1. INTRODUCCIÓN.....	12
4.1.2. PROPIEDADES.....	12
4.1.3. COMPOSICIÓN.....	13
4.1.3.1. CEMENTO.....	13
4.1.3.2. AGUA.....	14
4.1.3.3. ÁRIDOS.....	10
4.1.3.4. ADICIONES.....	21
4.1.3.5. ADITIVOS.....	22
4.1.4. HORMIGÓN Y MORTERO FRESCO.....	25
4.1.4.1. TRABAJABILIDAD O DOCILIDAD.....	26
4.1.4.2. CONSISTENCIA.....	26
4.1.4.3. HOMOGENEIDAD.....	27
4.1.4.4. OTRAS PROPIEDADES.....	27
4.1.5. HORMIGÓN Y MORTERO AUTOCOMPACTANTE.....	28
4.2. ULTRASONIDOS.....	30
4.2.1. INTRODUCCIÓN.....	30
4.2.2. TIPOS DE ONDA.....	30
4.2.2.1. ONDAS DE VOLUMEN.....	31
4.2.2.2. ONDAS DE SUPERFICIE.....	32
4.2.3 CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN Y MORTERO.....	32
CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	37
5.1. MATERIALES.....	37
5.2. PROCEDIMIENTO DE MEZCLA.....	39
5.3. MÉTODOS DE ENSAYO.....	40
5.3.1. ENSAYOS DE ULTRASONIDOS.....	40
5.3.1.1. DISPOSITIVO DE ULTRASONIDOS IP8.....	40
5.3.1.2 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO.....	41



5.3.1.3. VELOCIDAD DE LA ONDA-P.....	41
5.3.1.4. TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS.....	44
5.3.2. ENSAYOS FRESCOS.....	52
5.3.2.1. PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS FRESCOS...	52
5.3.2.2. ENSAYOS DE CONSISTENCIA.....	52
5.3.2.3. ENSAYO DE CONTENIDO EN AIRE Y DENSIDAD.....	53
CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	55
6.1. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO.....	55
6.2. RESULTADOS DE LA SERIE 1.....	58
6.2.1. ORGANIZACIÓN DE LA SERIE.....	58
6.2.2. ESTUDIO DEL PROCESO DE FRAGUADO.....	58
6.2.3. ENSAYOS FRESCOS.....	64
6.3. RESULTADOS DE LA SERIE 2.....	68
6.3.1. ORGANIZACIÓN DE LA SERIE.....	68
6.3.2. ESTUDIO DEL PROCESO DE FRAGUADO.....	68
6.3.3. ENSAYOS FRESCOS.....	74
6.4. RESULTADOS DE LA SERIE 3.....	78
6.4.1. ORGANIZACIÓN DE LA SERIE.....	78
6.4.2. ESTUDIO DEL PROCESO DE FRAGUADO.....	73
6.4.3. ENSAYOS FRESCOS.....	85
6.5. RESULTADOS DE LA SERIE 4.....	89
6.5.1. ORGANIZACIÓN DE LA SERIE.....	89
6.5.2. ESTUDIO DEL PROCESO DE FRAGUADO.....	89
6.5.3. ENSAYOS FRESCOS.....	97
6.6. COMPARACIÓN ENTRE EL GLENIUM 51 Y EL GLENIUM 27.....	101
6.6.1. INICIO DEL FRAGUADO.....	101
6.6.2. FINAL DEL FRAGUADO.....	102
6.6.3. ENSAYOS DE CONSISTENCIA.....	103
6.6.4. ENSAYOS DE CONTENIDO DE AIRE Y DENSIDAD.....	104
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	106
BIBLIOGRAFÍA.....	107
ANEXOS.....	109
ANEXO A: CURVAS DE VELOCIDAD Y GRADIENTE.....	109
ANEXO B: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SF Y FT.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Formación de los productos de hidratación.
- Figura 2. Grado de hidratación y esfuerzo de compresión en función del tiempo durante el proceso de hidratación.
- Figura 3. Modelo simplificado de la estructura de la pasta de cemento hidratada.
- Figura 4. Ejemplos de áridos.
- Figura 5. Cenizas volantes.
- Figura 6. Efecto dispersor de los granos de cemento por repulsión electrostática.
- Figura 7. Efecto dispersor de los granos de cemento por impedimento estérico.
- Figura 8. Ejemplo de influencia del tiempo para el efecto en la fluidez de un superplastificador.
- Figura 9. Hormigón en estado fresco.
- Figura 10. Ondas de volumen.
- Figura 11. Onda de Rayleigh.
- Figura 12. Curva de velocidad de la onda-p en función del tiempo para una mezcla de mortero.
- Figura 13. Parámetros T_{1500} y T_{2975} sobre una curva de velocidad de la onda-p.
- Figura 14. Parámetros T_{MG} y T_{20} sobre una curva del gradiente de la velocidad de la onda-p.
- Figura 15. Configuración del dispositivo IP8 para cuatro canales.
- Figura 16. Ejemplo de velocidad de la onda-p calculada por el IP8.
- Figura 17. Dos ejemplos diferentes de velocidad de la onda-p.
- Figura 18. Ejemplo de curva de gradiente de la velocidad de la onda-p sin tratar.
- Figura 19. Ejemplo de saltos de la curva de velocidad de la onda-p.
- Figura 20. Ejemplo de picos alrededor de dos posibles valores de la curva de velocidad de la onda-p.
- Figura 21. Ejemplo de valores inesperados muy altos en la curva de velocidad de la onda-p.
- Figura 22. Ejemplo de picos inesperados y su solución.
- Figura 23. Ejemplo de inicios de curvas de velocidad de la onda-p y sus soluciones.
- Figura 24. Ejemplo de aproximación del polinomio a los resultados de la velocidad de la onda-p.
- Figura 25. Curvas de velocidad de la onda-p y canal media de la mezcla ejemplo.
- Figura 26. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p y canal media de la mezcla ejemplo.
- Figura 27. T_{1500} y T_{2975} en la curva de velocidad del canal media de la mezcla ejemplo.
- Figura 28. T_{MG} y T_{20} en la curva del gradiente de velocidad del canal media de la mezcla ejemplo.
- Figura 29. Procedimiento de las pruebas “slump flow” y “flow table”.
- Figura 30. Cámara de presión utilizada en la prueba “air content”.
- Figura 31. Curvas de referencia.
- Figura 32. T_{MG} en función del orden del polinomio para las curvas de referencia.

- Figura 33. Curvas de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.662, 0.703, 0.750, 0.804 y 0.865 de la serie 1.
- Figura 34. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.662, 0.703, 0.750, 0.804 y 0.865 de la serie 1.
- Figura 35. T_{MG} y T_{1500} de la serie 1.
- Figura 36. Comparación de T_{MG} y T_{1500} de la serie 1.
- Figura 37. T_{20} y T_{2975} de la serie 1.
- Figura 38. Comparación de T_{20} y T_{2975} de la serie 1.
- Figura 39. Ensayos de consistencia de la serie 1.
- Figura 40. T_{MG} en función de la SF y FT de la serie 1.
- Figura 41. Contenido en aire de la serie 1
- Figura 42. Densidad de la serie 1.
- Figura 43. Contenido en aire en función de la densidad de la serie 1.
- Figura 44. Curvas de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.643, 0.692, 0.750 y 0.818 de la serie 2.
- Figura 45. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.643, 0.692, 0.750 y 0.818 de la serie 2.
- Figura 46. T_{MG} y T_{1500} de la serie 2.
- Figura 47. Comparación de T_{MG} y T_{1500} de la serie 2.
- Figura 48. T_{20} y T_{2975} de la serie 2.
- Figura 49. Comparación de T_{20} y T_{2975} de la serie 2.
- Figura 50. Ensayos de consistencia de la serie 2.
- Figura 51. T_{MG} en función de SF y FT de la serie 2.
- Figura 52. Contenido en aire de la serie 2.
- Figura 53. Densidad de la serie 2.
- Figura 54. Contenido en aire en función de la densidad de la serie 2.
- Figura 55. Curvas de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.40%, 0.60%, 1.00% y 1.10% de la serie 3.
- Figura 56. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.40%, 0.60%, 1.00% y 1.10% de la serie 3.
- Figura 57. T_{MG} y T_{1500} con ajuste exponencial de la serie 3.
- Figura 58. T_{MG} y T_{1500} con ajuste bilineal de la serie 3.
- Figura 59. Comparación de T_{MG} y T_{1500} de la serie 3.
- Figura 60. T_{20} y T_{2975} de la serie 3.
- Figura 61. Comparación de T_{20} y T_{2975} de la serie 3.
- Figura 62. Ensayos de consistencia de la serie 3.
- Figura 63. T_{MG} en función de SF y FT de la serie 3.
- Figura 64. Contenido en aire de la serie 3.
- Figura 65. Densidad de la serie 3.
- Figura 66. Contenido en aire en función de la densidad de la serie 3.
- Figura 67. Curvas de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.80%, 1.20%, 1.60% y 2.00% de la serie 4-1.
- Figura 68. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.80%, 1.20%, 1.60% y 2.00% de la serie 4-1.
- Figura 69. T_{MG} y T_{1500} de la serie 4-1 y 4-2.
- Figura 70. Comparación de T_{MG} y T_{1500} de la serie 4-1 y 4-2.



- Figura 71. T_{20} y T_{2975} de la serie 4-1 y 4-2.
Figura 72. Comparación de T_{20} y T_{2975} de la serie 4-1 y 4-2.
Figura 73. Ensayos de consistencia de la serie 4.
Figura 74. T_{MG} en función de SF y FT de la serie 4.
Figura 75. Contenido en aire de la serie 4.
Figura 76. Densidad de la serie 4.
Figura 77. Contenido en aire en función de la densidad de la serie 4.
Figura 78. T_{MG} de las series 3, 4-1 y 4-2.
Figura 79. T_{1500} de las series 3, 4-1 y 4-2.
Figura 80. T_{20} de las series 3, 4-1 y 4-2.
Figura 81. T_{2975} de las series 3, 4-1 y 4-2.
Figura 82. SF de las series 3, 4-1 y 4-2.
Figura 83. FT de las series 3, 4-1 y 4-2.
Figura 84. AC de las series 3, 4-1 y 4-2.
Figura 85. BD de las series 3, 4-1 y 4-2.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Especificación de las diversas clases de cemento.
Tabla 2.	Componentes principales del cemento Portland.
Tabla 3.	Composición de las mezclas.
Tabla 4.	Ejemplo de resultados de T_{MG} , T_{1500} , T_{20} y T_{2975} .
Tabla 5.	Comparación entre T_{MG} calculado por el algoritmo con orden 50 y el valor real de las curvas de referencia.
Tabla 6.	Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 1.
Tabla 7.	Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 1.
Tabla 8.	Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 1.
Tabla 9.	Resultados de los ensayos frescos de la serie 1.
Tabla 10.	Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 2.
Tabla 11.	Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 2.
Tabla 12.	Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 2.
Tabla 13.	Resultados de los ensayos frescos de la serie 2.
Tabla 14.	Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 3.
Tabla 15.	Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 3.
Tabla 16.	Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 3.
Tabla 17.	Resultados de los ensayos frescos de la serie 3.
Tabla 18.	Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 4-1.
Tabla 19.	Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 4-2.
Tabla 20.	Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 4-1 y 4-2.
Tabla 21.	Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 4.
Tabla 22.	Diferencias entre los valores de T_{MG1} y su media para la mezclas con desde 1.20% hasta 2.20% de la serie 4.
Tabla 23.	Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 4-1 y 4-2.
Tabla 24.	Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 4.
Tabla 25.	Resultados de los ensayos frescos de la serie 4.



GLOSARIO

SP: superplastificador

PCE: policarboxilato éter

G27: glenium 27

G51: glenium 51

CR: componentes reactivos presentes en el superplastificador

CV: cenizas volantes

C/P: relación cemento-material cementante

A/C: relación agua-cemento

EN: norma europea

T_{MG} : tiempo del máximo gradiente de la velocidad de la onda-p

T_{1500} : tiempo en el que la velocidad de la onda-p alcanza el valor 1500 m/s

T_{2975} : tiempo en el que la velocidad de la onda-p alcanza el valor 2975 m/s

T_{20} : tiempo en el que el gradiente alcanza el 20% del máximo gradiente de la onda-p

SF: ensayo “slump flow”

FT: ensayo “flow table”

AC: ensayo “air content”

BD: ensayo “bulk density”

CAPÍTULO 1: RESUMEN

El hormigón autocompactante está llamado a ser un material de gran importancia por las ventajas que presenta respecto al hormigón tradicional. Estas se basan principalmente en la gran fluidez que presenta, lo que provoca que no necesite ninguna vibración para compactarse y que pueda rellenar fácilmente los encofrados.

Dos de los aditivos más usados para conseguir este tipo de hormigones son las CV y el SP. Debido a esto, en este trabajo se realizó un estudio de la influencia que tiene la adición de estos materiales en el proceso de fraguado y en las propiedades frescas en mezclas de mortero.

El presente trabajo fue realizado en la Real Escuela Militar de Bruselas de julio a diciembre de 2010, y para ello se prepararon distintas mezclas de mortero que se organizaron en cuatro series. En todas ellas los componentes usados fueron: arena normalizada, agua, cemento, CV y SP; pudiendo ser este G51 o G27. En dos de las series se fijó la cantidad de todos los materiales menos la de CV, con la diferencia de que en una se usaba G51 y en la otra G27. Para la preparación de las dos series restantes también se fijó la cantidad de todos los componentes excepto la de G51 en una y la de G27 en la otra. Sobre estas mezclas se realizaron distintos ensayos que se organizan en dos tipos: ensayos de ultrasonidos y ensayos frescos.

En los ensayos de ultrasonidos se utilizó el dispositivo IP8, que obtiene el tiempo de tránsito de señales de la onda-p que viajan a través del material ensayado. Estas pruebas duraron dos días y se hicieron para calcular los tiempos de inicio y fin del fraguado en base a cuatro parámetros utilizados normalmente en este tipo de investigaciones: T_{MG} , T_{1500} , T_{20} y T_{2975} . En los ensayos frescos se midió la consistencia, el contenido en aire y la densidad cuando el mortero estaba recién mezclado.

Inicialmente se comprobó el algoritmo que venía usándose en la Real Escuela Militar, que aproxima un polinomio de alto orden a los resultados dados por el dispositivo IP8 y halla los parámetros indicadores del fraguado. Para ello se comprobó la influencia del orden del polinomio en los valores obtenidos del parámetro T_{MG} , y después se comparó los resultados obtenidos de T_{MG} por dicho algoritmo para 4 curvas de referencia donde el valor de este parámetro es conocido.

Una vez comprobado dicho algoritmo se realizaron los ensayos sobre las mezclas de mortero organizadas en las cuatro series anteriormente citadas, analizando la influencia en los resultados de las CV y el SP, y comparando el efecto de los dos tipos de SP usados: G51 y G27.



CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN

Desde el principio de los tiempos de la humanidad los materiales de construcción tales como el hormigón o el mortero han tenido una enorme importancia. A través de estos se busco el poder construir estructuras que sirviesen para mejorar la calidad de vida de las personas.

Al principio el hombre comenzó a construir edificaciones a base de materiales arcillosos o pétreos, para lo que necesitaba hacer pastas para unir estos compuestos y poder formar estructuras estables. Estas pastas se elaboraban en un principio con arcilla yeso o cal, pero estas se deterioraban fácilmente. Por este motivo en el Antiguo Egipto se empezó a mezclar pastas de yesos y calizas con agua para poder unir solidamente grandes bloques de piedras. Más adelante estas técnicas fueron desarrolladas por griegos y romanos quienes desarrollarían los primeros hormigones de la historia.

No se producirían grandes avances en este campo hasta 1824, año en el que Joseph Aspdin y James Parker patentaron el cemento Portland, obtenido de caliza arcillosa y carbón calcinados a alta temperatura. A partir de este momento la ciencia de los materiales de construcción no ha parado de desarrollarse, siendo un campo en el cual se sigue investigando mucho actualmente. Son numerosos los avances logrados en el siglo XX tales como el desarrollo del hormigón armado, el uso de nuevos aditivos en la fabricación del hormigón, el empleo de ultrasonidos para conocer mas detalles acerca de la microestructura de este, etc.

Sin duda, uno de los últimos grandes avances en este campo ha sido el hormigón autocompactante. Este tipo de hormigón comenzó a desarrollarse en Japón durante la década de 1980 y tiene la gran ventaja de poder compactarse por si solo, sin la necesidad de vibración, y además tiene la capacidad de rellenar todos los huecos del encofrado aunque estos sean estrechos o de geometrías complejas.

El uso de aditivos y superplastificantes en las dosis adecuadas es fundamental para la obtención del hormigón autocompactante, ya que estos le confieren al hormigón en estado fresco la fluidez necesaria. Actualmente el precio de estos materiales sigue siendo alto, por lo que encarecen la producción de este tipo de hormigones. En la medida que se consiga abaratar estos materiales el hormigón autocompactante podrá tener un gran futuro.

El trabajo aquí presente ha sido desarrollado en la Real Escuela Militar de Bruselas desde julio hasta diciembre del 2010 gracias a una beca otorgada por el Ministerio de Educación de España, y se encuadra dentro de un gran proyecto que tiene por objeto analizar las propiedades del hormigón autocompactantes cuando diferentes aditivos y adiciones son añadidos.

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

El presente trabajo se enmarca dentro de un gran proyecto que estudia la influencia de diferentes aditivos en las propiedades del hormigón autocompactante. Este trabajo colabora a la realización de dicho proyecto estudiando la influencia, sobre el proceso de fraguado y las propiedades frescas de morteros autocompactantes, de dos aditivos: las CV y el SP, en este caso los SP usados han sido el G51 y el G27. Para ello este trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Comprobación del algoritmo de cálculo que se viene usando en el proyecto general para calcular los parámetros indicadores del fraguado a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de ultrasonidos:
 - Análisis de la influencia del orden del polinomio, usado en el algoritmo de cálculo, en los resultados de los parámetros indicadores del fraguado.
 - Comparación de los resultados obtenidos por dicho algoritmo sobre unas curvas donde el valor de estos parámetros es conocido.
- Estudio de la influencia de las CV y de los SP G51 y G27 en el proceso de fraguado de mezclas de mortero a través de la realización de ensayos de ultrasonidos y el posterior tratamiento de los resultados con el algoritmo de cálculo de los parámetros indicadores del fraguado.
- Realización de ensayos frescos para medir la consistencia, el contenido en aire y la densidad de las mezclas de mortero preparadas y relacionar sus resultados con los obtenidos en los ensayos de ultrasonidos.
- Comparación de la influencia de los dos tipos de SP usados durante este trabajo: G51 y G27, tanto en los ensayos de ultrasonidos como en los ensayos frescos.

CAPÍTULO 4: ANTECEDENTES

4.1 Hormigón y mortero

4.1.1. Introducción

El hormigón es el material resultante de la mezcla de cemento, agua, áridos finos y gruesos y otros constituyentes. El cemento y el agua forman una pasta moldeable para adherir partículas de los agregados que fragua y se endurece en pocas horas. El hormigón es un material que gracias a su versatilidad, precio y eficiencia energética se ha convertido en indispensable en cualquier tipo de obra en todo el mundo. Muchas estructuras tienen hormigón como su principal componente, aunque muchas veces este se refuerza con barras de hierro, fibras de vidrio, etc, ya que el hormigón tiene buena resistencia a tensiones y esfuerzos de compresión pero su resistencia a los esfuerzos de tracción es reducida.

El mortero tiene los mismos constituyentes que el hormigón a excepción de los áridos gruesos, es decir, es la mezcla de áridos finos, cemento, agua y otros constituyentes. La Instrucción Española del Hormigón, define como árido fino a la fracción que pasa por un tamiz de 4 mm, siendo árido grueso la que queda retenida por este tamiz.

4.1.2. Propiedades

La propiedad fundamental de estos materiales es el endurecimiento que van adquiriendo con el paso del tiempo que, por supuesto depende en gran medida de la microestructura que estos tengan, que en ocasiones puede ser muy compleja. Pero además de esto en el estudio de estos materiales suele haber muchos otros factores implicados, como pueden ser [1]:

- En muchas ocasiones contienen otros tipos de agregados en pequeñas o grandes cantidades, los cuales modifican sus propiedades. Este cambio en las propiedades debe ser a mejor, aunque también pueden tener efectos adversos.
- Hay que tener en cuenta que son materiales que fraguan muy deprisa, por lo tanto, a la hora de mezclarlo hay que asegurarse que este pueda ser transportado desde el lugar de la mezcla y compactado en el sitio de trabajo satisfactoriamente. Por este motivo existen numerosos agregados que afectan a la reacción de hidratación que se produce en el cemento.
- Su endurecimiento esta cambiando constantemente con el tiempo. Aunque se estima que entre el 50 y el 60% del endurecimiento se produce en los primeros 7 días, y que entre el 80 y el 85% del endurecimiento se da en los

primeros 28 días, se ha comprobado que 30 años después se siguen endureciendo.

- Se pueden producir procesos de corrosión, especialmente si es hormigón armado, que afectan al endurecimiento del mismo y que hay que intentar evitar en la medida de lo posible o por lo menos controlarlos.

4.1.3. Composición

La composición del hormigón o el mortero depende de las propiedades deseadas, teniendo en cuenta tanto las propiedades frescas, es decir cuando han sido recién mezclados, como las propiedades finales. De todas formas, normalmente siempre estarán compuestos por los constituyentes que se explican a continuación.

4.1.3.1. Cemento

El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinada que es posteriormente molida, que tiene la propiedad de que en contacto con el agua fragua y se endurece formando un nuevo producto que es estable sumergido tanto en aire como en agua. Se encuentra en polvo y la finura que tenga es determinante en sus propiedades conglomerantes.

Los cementos se agrupan en 5 categorías principales:

- CEM I: cemento Portland.
- CEM II: cemento Portland con adiciones.
- CEM III: cemento de alto horno.
- CEM IV: cemento puzolánico.
- CEM V: cemento compuesto.

Los cementos se agrupan también según su clase, que indica su resistencia a la compresión expresada en N/mm^2 a la edad de 28 días. Los valores de esta categoría son: 32.5, 42.5 y 52.5. Además al número de la clase se le añade una letra que puede ser la N, si es un cemento de resistencia inicial normal; o la R, si es un cemento de alta resistencia inicial. En la tabla 1 se muestran diferentes propiedades del cemento según su clase.

Clase de resistencia	Resistencia [N/mm^2]			Fraguado		Expansión [mm]
	a 2 días	a 7 días	a 28 días	Inicio [min]	Final [h]	
32.5N		≥ 16.0	32.5–52.5	≥ 75.0	≤ 12.0	≤ 10.0
32.5R	≥ 10.0		32.5–52.5	≥ 75.0	≤ 12.0	≤ 10.0
42.5N	≥ 10.0		42.5–62.5	≥ 60.0	≤ 12.0	≤ 10.0
42.5R	≥ 20.0		42.5–62.5	≥ 60.0	≤ 12.0	≤ 10.0
52.5N	≥ 20.0		≥ 52.5	≥ 45.0	≤ 12.0	≤ 10.0
52.5R	≥ 30.0		≥ 52.5	≥ 45.0	≤ 12.0	≤ 10.0

Tabla 1. Especificación de las diversas clases de cemento.

Los cementos más importantes y usados en la actualidad son los cementos Portland. Los componentes minerales principales o activos del cemento Portland son los que se representan en la tabla 2. Estos están formados por la combinación de dos o más óxidos principales y forman cristales mixtos en los que entran compuestos de otras fases en cantidades reducidas [2].

Nombre	Composición	Fórmula abreviada	Nombre del mineral	Contenido [%]
silicato tricálcico	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2$	C_3S	Alita	50
silicato dicálcico	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2$	C_2S	Belita	25
aluminato tricálcico	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A		10
ferrito aluminato tetracálcico	$4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Celita	10

Tabla 2. Componentes principales del cemento Portland.

Las abreviaturas usadas son: $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$, y además se va a considerar también que $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$.

4.1.3.2. Agua

El agua es uno de los principales componentes del hormigón ya que es el desencadenante de la reacción química del cemento.

La cantidad agua que se añade a la mezcla es el factor mas importante que hay que controlar. Esta debe ser suficiente para que se produzca la reacción de hidratación en el cemento y para tener la suficiente trabajabilidad requerida según la aplicación. Pero hay que tener en cuenta que demasiada cantidad de agua puede provocar algunos problemas como: variaciones en las propiedades, segregación, defectos en la microestructura, etc.

En general un bajo A/C nos dará una mezcla muy resistente pero con poca trabajabilidad mientras que, si A/C es alto obtendremos lo contrario, baja resistencia pero alta trabajabilidad.

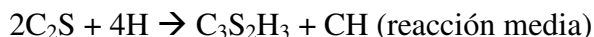
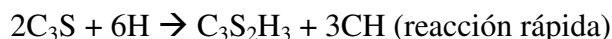
Reacción de hidratación

El proceso de hidratación empieza cuando el cemento entra en contacto con el agua. La hidratación es muy importante para las propiedades que tendrá la mezcla y puede continuar durante muchos años. La hidratación es un proceso exotérmico, es decir, a medida que va avanzando la reacción se libera calor y además también provoca cambios en la microestructura del cemento hidratado.

Reacciones químicas

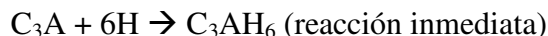
Cada grano de cemento es una mezcla compuesta principalmente por los cuatro componentes anteriormente citados (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF), los cuales reaccionan con el agua interactuando los unos con los otros.

Los silicatos cálcicos se transforman básicamente en silicatos cálcicos hidratados (CSH) e hidróxido de calcio (CH), y sus reacciones son las que se muestran a continuación:



El CSH supone del 50 al 60% del sólido de la pasta endurecida y es uno de los principales responsables del endurecimiento del cemento fraguado. El CH por contra queda incrustado en la matriz del CSH, rellenando los huecos de esta, pero no es un elemento importante en el endurecimiento de la pasta.

El aluminato tricálcico al reaccionar se transforma en etringita (C_3AH_6) mediante la siguiente reacción:



La etringita supone entre el 10 y el 20% de la pasta sólida. No tiene demasiada importancia en el proceso de endurecimiento de la pasta pero si le aporta mucha durabilidad.

Por último, el ferroaluminato tetracálcico debido al proceso de hidratación se transforma en etringita y monosulfato de aluminio hidratado (C_3FH_6) a través de la reacción:



El monosulfato de aluminio hidratado tiene la función de rellenar huecos ya que su reacción es la más lenta y cuando aparece el esqueleto de productos hidratados ya está formado.

Por lo tanto, el producto final de la reacción de hidratación es una pasta endurecida compuesto por los siguientes elementos: $C_3S_2H_3$, CH, C_3AH_6 , C_3FH_6 , cemento no hidratado, agua y huecos no rellenados [3].

El agua en el proceso hidratación

Durante el proceso hidratación el agua puede encontrarse en diferentes estados:

- Agua químicamente ligada: es aquella que forma parte del sólido generado o sea la que se combina con el cemento para producir una nueva fase diferente del agua y del cemento.
- Agua físicamente ligada: es aquella que se encuentra absorbida a la superficie de la partícula de gel y ocupa los poros.
- Agua libre: resto de agua que se encuentra en la pasta saturada y ocupa los poros capilares.

Microestructura durante el proceso de hidratación

En la figura 1 se muestra un esquema de la forma que va teniendo la estructura durante sus diferentes etapas:

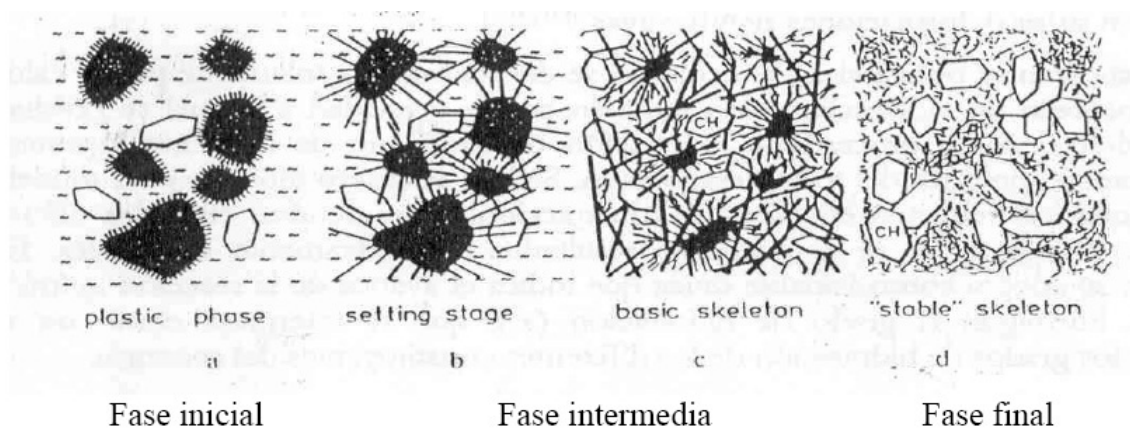


Figura 1. Formación de los productos de hidratación.

Fase de suspensión (fase inicial)

A los 10 min de mezclar el cemento con el agua ya puede observarse, con la ayuda de un microscopio electrónico, la aparición de gel alrededor de los granos de cemento no hidratado junto con pequeñas láminas delgadas de CSH. Aproximadamente a la hora, el



gel adquiere un espesor de 1 mm y bastoncillos cortos de etringita nuclean en la superficie del mismo. En este momento de la reacción todavía no existen fuerzas que ligen las partículas unas con otras ya que los granos de sólido están aislados en una fase líquida.

Fase de fraguado (fase intermedia)

Esta fase se caracteriza por la hidratación del 30 al 40% del C_3S y por el comienzo de la fase de endurecimiento de la pasta. Entre las 3 y las 5 h se puede verificar la aparición de una cierta cohesión en la pasta ya que se establecen conexiones mecánicas entre los granos de cemento apareciendo un esqueleto sólido y una red capilar. Los productos que se forman fuera de la frontera original del grano se denominan productos externos, mientras que los que se forman dentro de la misma son los denominados productos internos. Entre las 5 y las 10 h iniciales la reacción del C_3S genera productos externos que forman una cubierta sobre la red de bastoncillo de etringita que se ha generado.

Un concepto asociado con el del fraguado es el de la percolación ya que, se considera que existe una relación entre el inicio de la percolación y el inicio del fraguado. Percolación es cuando existe un camino completo de productos sólidos de hidratación [11].

Fase de endurecimiento (fase final):

Se caracteriza por el llenado de los espacios capilares por la masa sólida de hidratos. A las 24 h de comenzada la reacción, el C_3S sigue reaccionando y generando productos internos. A medida que los granos completamente hidratados se van superponiendo entre sí, la resistencia y el módulo de elasticidad de la pasta aumentan. En esta fase la mayoría de los granos pequeños del cemento ya han hidratado completamente. Después de 2 días, el espacio ocupado originalmente por el agua es ocupado por los productos de la hidratación.

Los productos externos se vuelven fibrosos y más densos. En esta etapa se encuentran fibras de CSH de 1 mm de longitud con un diámetro de 0.01 mm. También se encuentran partículas de CH en forma de láminas con tamaños del mismo orden de magnitud. El esqueleto básico se forma entre los 7 y los 28 días.

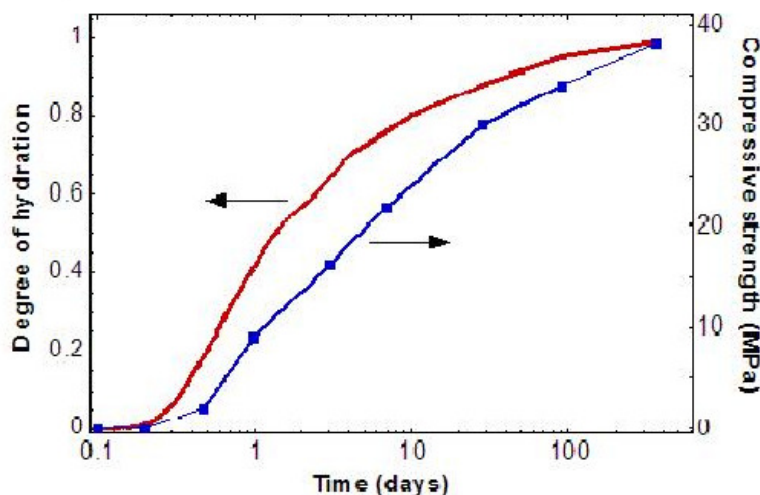


Figura 2. Grado de hidratación y esfuerzo de compresión en función del tiempo durante el proceso de hidratación.

En la figura 2 se aprecia que al principio apenas aparecen productos hidratados ni la mezcla se endurece hasta que empieza el fraguado donde, por la aparición de los productos de hidratación la mezcla empieza a endurecerse. También se ve que casi todo el endurecimiento se produce en los 30 primeros días aproximadamente (28 días se suele tomar como referencia), aunque después el endurecimiento continúa por muchos años.

Los primeros estudios realizados sobre las características mecánicas del hormigón relacionaban la resistencia de la pasta con el cociente A/C. En la actualidad se sabe que la resistencia de la pasta es función de la microestructura que se desarrolla durante el proceso de hidratación. La resistencia de una mezcla con una determinada relación A/C depende del grado de hidratación, de las características químicas y físicas del cemento, de la temperatura a la que se hidrata, el contenido de aire en la mezcla, etc. Es por esta razón que se considera necesario relacionar el desarrollo o evolución de la microestructura de la pasta de cemento con sus propiedades mecánicas, y en particular con su resistencia a la compresión.

Poros en la microestructura

Además de lo descrito anteriormente, en la microestructura aparecen poros entre los cuales se distinguen dos tipos:

- Poros capilares: representan todo aquel volumen que no ha sido llenado por los productos de la hidratación y que se reduce a medida que avanza la reacción. La porosidad capilar de la pasta de cemento depende de la relación A/C y del grado de hidratación conseguido. Para relaciones A/C mayores que 0.38, el volumen de gel no es suficiente para llenar todo el espacio disponible, por lo que quedarán espacios capilares una vez finalizada la reacción. Los poros capilares forman una red interconectada que es

responsable de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida y de su vulnerabilidad al congelamiento.

- Poros intersticiales: son espacios interconectados entre las partículas de gel. Los poros intersticiales son mucho más pequeños que los poros capilares y suelen contener gran cantidad de agua evaporable. Ocupan aproximadamente un 28% del volumen total de gel, independientemente de la relación A/C y del grado de avance de la reacción.

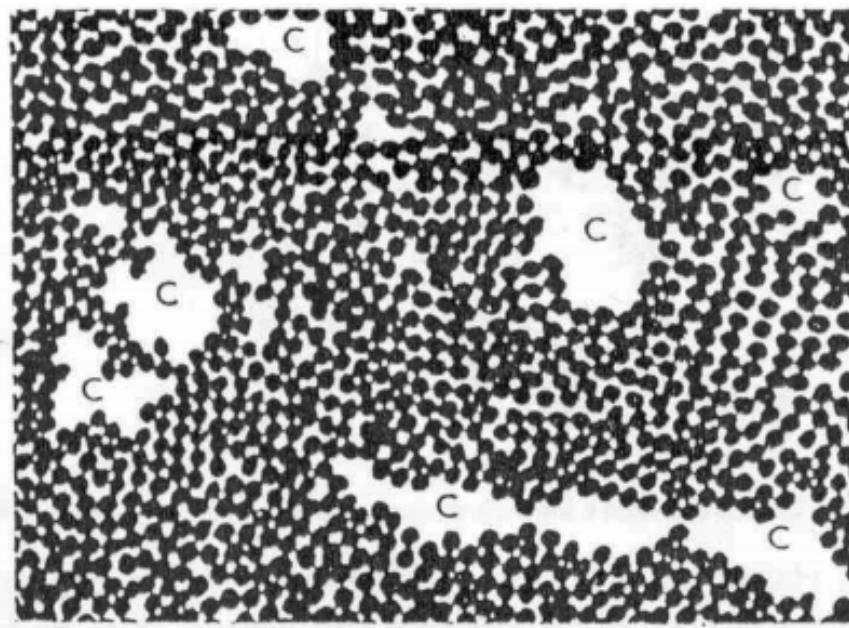


Figura 3. Modelo simplificado de la estructura de la pasta de cemento hidratada.

En la figura 3 se muestra un esquema simplificado de la estructura de la pasta de cemento hidratada. Los puntos negros representan las partículas de gel, los espacios intersticiales constituyen la porosidad propia del gel y los espacios marcados con C son los espacios o poros capilares.

Lo visto hasta aquí es para la hidratación del cemento, sin embargo, hay que tener en cuenta que la formación del mortero o el hormigón habrá otros agregados que variarán estas reacciones [4].

4.1.3.3. Áridos

Los áridos suelen suponer de un 60 a un 75 % del volumen total del hormigón, se clasifican según su tamaño o forma y tienen muy diversas misiones. La arena y la grava son los principales.

Para tener un buen hormigón es importante que los áridos posean por lo menos la misma resistencia y durabilidad que se exija al hormigón. Su principal misión es formar parte del esqueleto y mejorar sus propiedades.

Los áridos que se emplean en hormigones se obtienen mezclando tres o cuatro grupos de distintos tamaños para alcanzar una granulometría óptima. Tres factores intervienen en una granulometría adecuada: el tamaño máximo del árido, la compacidad y el contenido de granos finos. Cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido menores serán las necesidades de cemento y de agua, pero el tamaño máximo viene limitado por las dimensiones mínimas del elemento a construir o por la separación entre armaduras, ya que esos huecos deben quedar rellenos por el hormigón y, por tanto, por los áridos de mayor tamaño. En cuanto a la compacidad, si esta es elevada deja pocos huecos; lo que se consigue con mezclas pobres en arenas y gran proporción de áridos gruesos. En cuanto al contenido de granos finos, estos hacen la mezcla más trabajables pero precisan más agua de amasado y de cemento. En cada caso hay que encontrar una fórmula de compromiso teniendo en cuenta los distintos factores [2].

En la figura 4 se muestran algunos ejemplos de áridos:

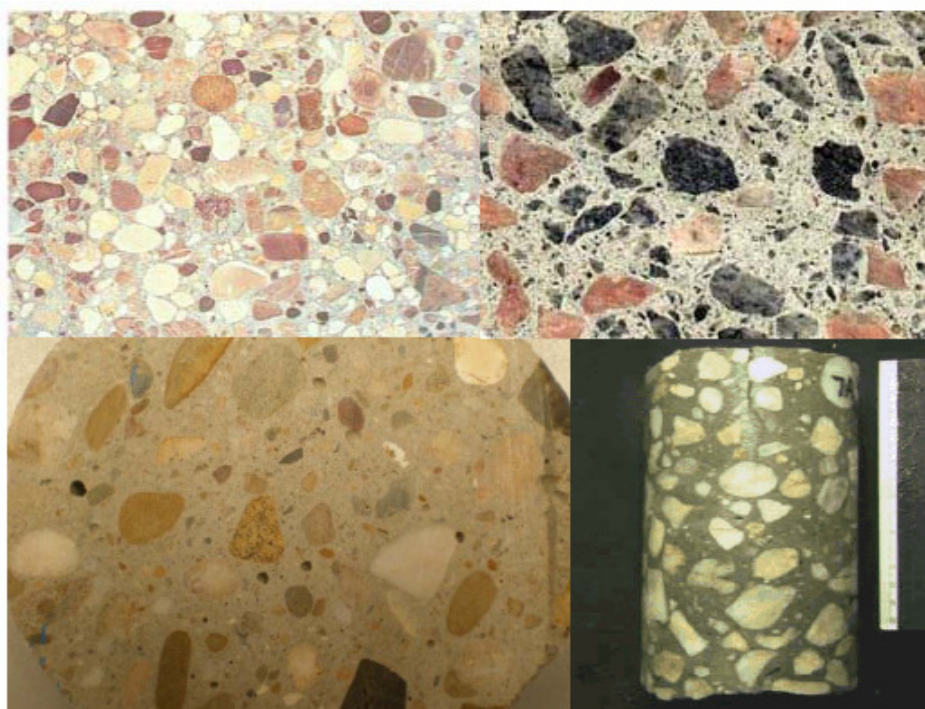


Figura 4. Ejemplos de áridos.

4.1.3.4. Adiciones

Se conoce con el nombre de adiciones a aquellos materiales que pueden añadirse al cemento, mortero u hormigón con la finalidad de mejorar alguna de las características físicas y/o químicas de los mismos o de conferirles algunas especiales.

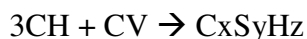
Las adiciones pueden ser: puzolanas naturales, escorias de horno alto, microsílice, etc, además de CV que son detalladas a continuación.

Cenizas Volantes

Las CV son residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados. Se utilizan como adiciones para hormigón y su uso ha alcanzado una gran importancia convirtiéndose en un aditivo habitual en las mezclas de hormigón y mortero.

La CV es un material puzolánico artificial que debido a su composición son capaces de combinarse con la cal procedente de la hidratación de los componentes activos del cemento Portland para dar compuestos, especialmente silicatos hidratados parecidos a los procedentes de la hidratación del cemento, que van a contribuir a incrementar la resistencia mecánica del cemento. A la vez, al reaccionar con la cal la van a fijar impidiendo problemas de lixiviación mejorando su durabilidad.

Durante el proceso de hidratación del cemento con cenizas volantes ocurren dos reacciones químicas principales: en la primera se produce gel CSH e CH por la hidratación del cemento Portland y en la segunda el CH se combina con las cenizas volantes para formar nuevos geles CSH. El resultado suele traducirse en nuevos hormigones con mejores propiedades físicas y mecánicas.



El uso de CV como adición del hormigón está ampliamente extendido por dos razones: el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado y los cambios microestructurales motivados por la adición. Sobre este segundo punto existe consenso en considerar que las cenizas generan un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro. Sin embargo, la importancia relativa de los cambios de composición y microestructurales en las propiedades mecánicas y la durabilidad del material no están completamente claras [3].

Las CV actúan como retardadores del proceso de hidratación ya que se colocan entre los granos de cemento, por lo que el contacto entre el agua y la superficie de los granos de cemento será peor durante la reacción de hidratación. Además si se añaden muchas CV al hormigón o al mortero los granos de cemento estarán más separados los unos de los

otros por lo que serán necesarios más productos hidratados para que aparezcan conexiones mecánicas entre ellos y empiece el proceso de fraguado.

En cuanto a las propiedades frescas del hormigón o del mortero, al añadir CV las mezclas son menos fluidas, ya que hay más partículas sólidas presentes, lo que hace que la fricción en la mezcla sea mayor. Además al haber más partículas sólidas más agua es absorbida por estas por lo que la lubricación es peor. Este aumento de la fricción también provoca que a las burbujas de aire existentes en el hormigón o el mortero les cueste más abandonar la mezcla, por lo que si se añaden CV se espera tener mezclas con más aire y menos densas.

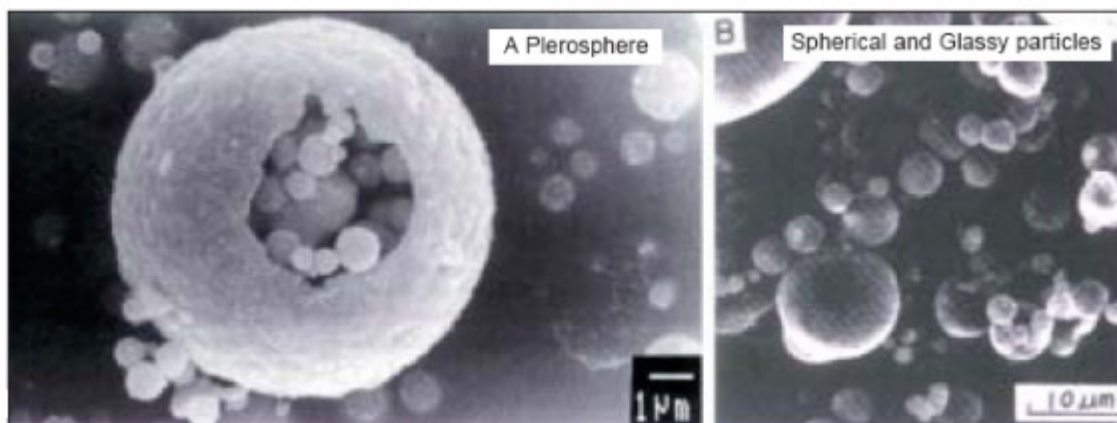


Figura 5. Cenizas volantes.

4.1.3.5. Aditivos

Los aditivos son productos que se añaden al hormigón o al mortero en el momento de su elaboración y que tienen por objetivo modificar en sentido positivo alguna de las propiedades del hormigón o mortero.

Estos componentes son usados para modificar gran cantidad de propiedades del hormigón como puede ser su trabajabilidad, estabilidad, fluidez, compactación, permeabilidad, consistencia, etc; aunque se deben usar en las dosis correctas por que de sobrepasar esta dosis podrían tener efectos adversos.

Existen varios tipos de aditivos: reductores de agua, inclusores de aire, aceleradores del endurecimiento, etc, además de SP que son detallados a continuación.

Superplastificadores

Los SP (también conocidos como reductores de agua de alto rango) son productos químicos que se usan en aplicaciones donde se requiere una gran dispersión de partículas en suspensión. El uso de SP permite poder reducir la cantidad de agua en una mezcla hasta un 30 % teniendo la misma trabajabilidad.

Los SP se usan cuando se necesita un hormigón de alta fluidez y gran compactación ya que, esto provoca que se pueda colocar el hormigón en estructuras complicadas, con alta densidad de armadura o con efectos superficiales especiales, sin necesidad de incrementar cantidad de agua de amasado y por consiguiente la dosis de cemento para obtener las resistencias especificadas.

La disminución de la dosis de agua y en consecuencia de la relación A/C, manteniendo una determinada trabajabilidad, permite aumentar la compacidad del hormigón y por consiguiente, su resistencia, impermeabilidad y durabilidad. Por la misma razón, la retracción y la tendencia a la fisuración se ven disminuidas.

Los SP provocan una fuerte dispersión de los granos de cemento, y esto lo consiguen mediante repulsión electrostática e impedimento estérico. La repulsión electrostática consiste en que las moléculas de los SP se fijan a la superficie de los granos de cemento, cargando negativamente la superficie de estos en un orden de unos pocos milivoltios. Esto provoca que aparezcan fuerzas de repulsión entre los granos de cemento y que por lo tanto haya una dispersión de estos. El impedimento estérico se consigue por que las cadenas de los SP al fijarse a la superficie de los granos de cemento se enredan con las cadenas de los granos adyacentes, manteniendo a los granos de cemento separados [5].

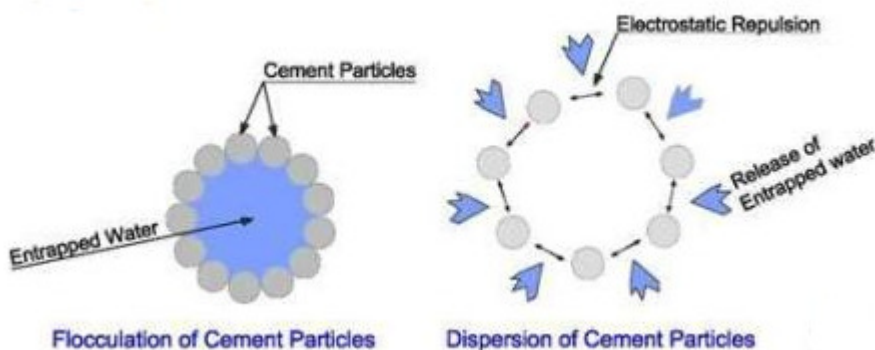


Figura 6. Efecto dispersor de los granos de cemento por repulsión electrostática.

Existen varios tipos de SP, entre los que se destaca el policarboxilato éter. Estos SP son los más recientes en la industria y están formados por largas cadenas de polímeros de lignosulfonato de calcio y sulfonato de naftaleno. El mecanismo principal dispersor de este SP es el impedimento estérico ya que sus cadenas son muy largas lo que provoca que se separen mucho los granos de cemento. Además el impedimento estérico es su principal modo de dispersar los granos de cemento porque su carga negativa es pequeña.

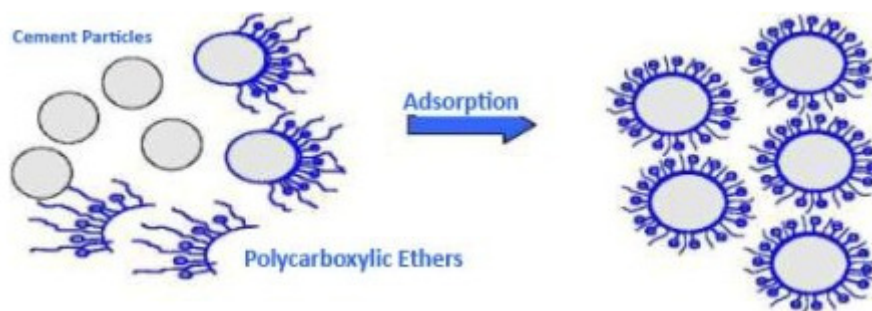


Figura 7. Efecto dispersor de los granos de cemento por impedimento estérico.

Esta dispersión de los granos de cemento provoca que se retrase el proceso de hidratación del fraguado, ya que se necesitan más productos de hidratación para que se interconecten entre ellos. Además las cadenas de policarboxilato éter se fijan en la superficie de los granos de cemento, lo que impedirá que haya un buen contacto entre agua y cemento, haciendo que sea más difícil el proceso de hidratación [6].

Esta misma dispersión provoca que las mezclas de mortero u hormigón sean más fluidas, ya que al haber menos contacto entre partículas sólidas habrá menos fricción en la mezcla y además habrá más agua libre (porque se reducen los flóculos). Si hay menos fricción, las burbujas de aire podrán escapar más fácilmente de la mezcla, provocando que esta tenga menos aire en su interior y sea más densa cuando se añade SP.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que si se usa más cantidad de SP del debido puede haber efectos adversos, como pueden ser: segregación, exudación o un retraso excesivo en el proceso de hidratación. Además hay que tener en cuenta que la fluidez de la mezcla puede aumentar hasta un cierto punto ya que, existe un punto de saturación a partir del cual aunque se añada más SP las mezclas no son más fluidas.

También es importante tener en cuenta que los efectos del SP son por un tiempo limitado, como se muestra en la figura 8.

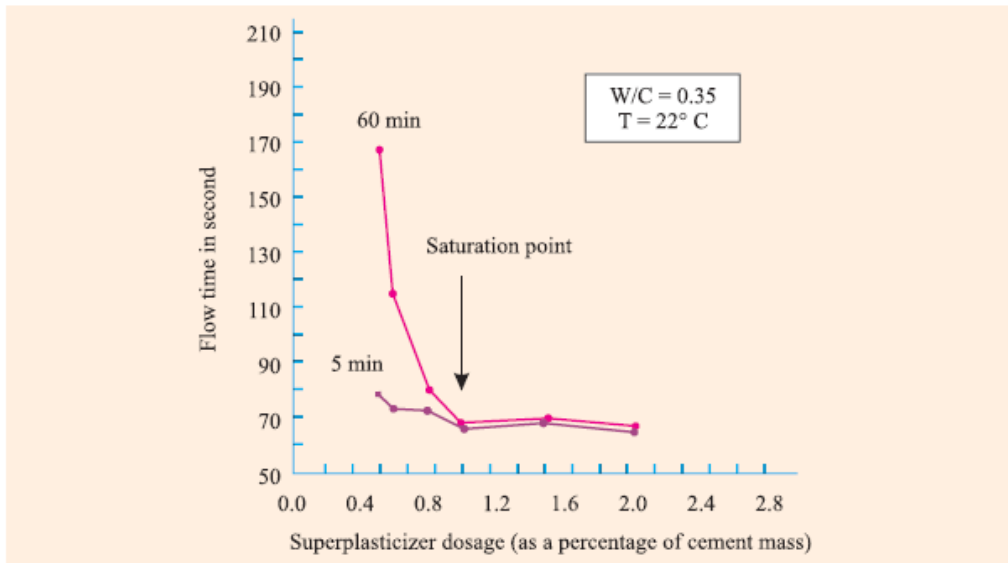


Figura 8. Ejemplo de influencia del tiempo para el efecto en la fluidez de un superplastificador.

La figura 8 muestra la pérdida de fluidez en una mezcla en función del tiempo transcurrido después de la adición del SP.

Por lo tanto para resumir podemos decir que con el uso de SP [3]:

- Con un mismo ratio A/C se obtiene un hormigón con mucha más trabajabilidad.
- Para una misma trabajabilidad se puede usar un cociente A/C mucho menor.
- Como consecuencia del incremento de fuerza por tener un ratio A/C más bajo se puede reducir la cantidad de cemento.

4.1.4. Hormigón y mortero fresco

Hormigón o mortero fresco es aquel que puede moldearse, y el tiempo en el que se considera fresco es aquel que va desde que abandona la mezcladora hasta que se inicia el fraguado del cemento. Este tiempo depende del tipo de cemento empleado, de la temperatura, del empleo de aditivos, etc. Las propiedades en estado fresco son muy importantes ya que en este estado se producirá su transporte, colocado y compactación.



Figura 9. Hormigón en estado fresco.

El hormigón es un material que está formado por componentes muy dispares. Cuando está endurecido los componentes se encuentran sujetos por la pasta de cemento, pero en estado fresco están sueltos, lo cual puede dar problemas de segregación. La composición de la masa tiene una gran importancia en la cohesión de los componentes y por lo tanto en las propiedades en estado fresco.

Las principales propiedades del hormigón o mortero en su estado fresco son las siguientes:

4.1.4.1. Trabajabilidad o docilidad

Trabajabilidad es la facilidad con que el hormigón o el mortero es manejado, transportado, colocado y compactado en los moldes o encofrados con la mínima pérdida de homogeneidad, es decir, sin que se produzca segregación o exudación.

Esta propiedad comprende otras ciertas propiedades como son: moldeabilidad, cohesión y compactación. Dicha propiedad se altera por la composición de los agregados, la forma de las partículas, la cantidad de cemento, la presencia del aire incluido, los aditivos, la consistencia de la mezcla, etc.

4.1.4.2. Consistencia

Es la oposición que presenta el hormigón o el mortero fresco a experimentar deformaciones, siendo por tanto, una propiedad física inherente al propio hormigón. La consistencia depende de varios factores pero su sensibilidad es muy fuerte frente a las variaciones de agua.

Trabajabilidad y consistencia no son propiedades independientes, están relacionadas. Esto no quiere decir que si un hormigón posee una consistencia más fluida que otro es más trabajable, ya que la trabajabilidad también está ligada con el método de puesta en obra.

4.1.4.3. Homogeneidad

El hormigón es una mezcla de componentes sólidos muy diferentes y de un líquido, por lo que se trata de un material heterogéneo. Sin embargo, cuando se dice que debe ser un material homogéneo se refiere a que debe ser uniformemente heterogéneo, es decir, que en cualquier parte de su masa los componentes del hormigón deben de estar perfectamente mezclados y en la proporción prevista al diseñar la mezcla.

La homogeneidad se logra en la mezcladora pero, la mezcla puede dislocarse después de salir de ella dando lugar a que los elementos tiendan a separarse y a decantarse de acuerdo a su tamaño y densidad. A este fenómeno se le conoce como segregación y no es deseable ya que las propiedades variarán de una zona a otra.

Las mezclas que tienen tendencia a segregar son aquellas que tienen poca trabajabilidad y las que son extremadamente secas o fluidas. Los hormigones deben ser dóciles sin que se produzca segregación.

La segregación ocurre especialmente si se utilizan distintos tipos de áridos y en mezclas pobres en agua. Los áridos más gruesos tenderán a depositarse en el fondo mientras que los más finos se posarán encima de estos. Si a este hormigón o mortero se le aumentará la cantidad de agua se mejoraría su cohesión a la vez que se irá eliminando la segregación.

También existe otro tipo de segregación, llamada exudación, que se da cuando el agua tiende a desplazarse hacia el exterior como consecuencia de la incapacidad de los áridos de arrastrarla con ellos al irse compactando. Al desplazarse, el agua puede arrastrar cemento u otras adicciones, dejando la parte interna con menos cemento.

Por lo tanto hay bastantes factores que afectan a la segregación de una mezcla como son: el tipo y cantidad de cemento, de agua, de áridos o de adicciones que se usen, o el uso de ciertos aditivos, etc [2].

4.1.4.4. Otras propiedades

Estas tres son las propiedades fundamentales, pero a parte de estas también existen otras como son:

- Densidad: es la cantidad de peso por unidad de volumen (peso/volumen). Variará con la clase de áridos y con la forma de colocación en obra.

- Resistencia mecánica: es la capacidad que tiene para soportar las cargas que se aplican sin agrietarse o romperse. Es diferente según el tipo de esfuerzo, por ejemplo, su resistencia a la compresión es unas 10 veces mayor que su resistencia a la tracción. Esta baja resistencia a la tracción es la que llevó a incorporar varillas de hierro o acero al hormigón para conformar el hormigón armado.
- Durabilidad: es la capacidad para resistir el paso del tiempo.
- Permeabilidad: es la capacidad de un material de ser atravesado por líquidos o gases. La impermeabilidad del hormigón es importante para su resistencia a los ataques químicos. Esta impermeabilidad depende en parte del exceso de agua en el amasado y del posterior proceso de curado.
- Porosidad: la porosidad se considera la proporción de huecos respecto de la masa total. Influye en la resistencia, la densidad, y la permeabilidad.

4.1.5. Hormigón y mortero autocompactante

Es un tipo de hormigón o mortero especial que aparece en Japón en la década de 1980. Las diferencias principales respecto a los hormigones tradicionales son: su gran fluidez, su cohesión (que evita así problemas de segregación o exudación), el no precisar vibrado compactándose por la acción de su propio peso, la poca influencia que tiene la puesta en obra en su calidad y la gran facilidad que tiene para rellenar moldes aunque sean estrechos o de formas complejas.

Para la fabricación de estos materiales es totalmente imprescindible el empleo de aditivos, especialmente SP que, le confieren al hormigón en estado fresco la fluidez necesaria para que pueda rellenar los encofrados sin que ningún tipo de vibración sea requerida. Se suelen usar en proporciones de hasta un 3% de la masa del cemento. También se suelen incluir aditivos a la mezcla como CV que le confieren resistencia a la flexión y dan hormigones más compactos.

El hormigón o mortero autocompactante posee muchas ventajas, algunas de las cuales se enumeran a continuación:

- Hormigonado fácil y rápido.
- Puesta en obra: cualidad más destacada ya que se prescinde totalmente del vibrado del hormigón fresco (no debe hacerse con este tipo de hormigón).
- Mayor resistencia a la compresión con igual contenido de cemento.
- Acabado superficial excelente por su capacidad de adaptación y perfecto llenado del encofrado.



- Gran capacidad de adaptabilidad que hace que pueda aplicarse a formas complejas.
- Compatible con armado de fibras, adición de colorantes, etc.
- Mayor durabilidad e impermeabilidad.
- Menor contaminación acústica en la obra ya que no requiere vibración.

Por contra este tipo de hormigón tiene algunos inconvenientes:

- Estricto control de dosificación, lo que exige un estudio de las dosificaciones mucho más completo que el de los hormigones tradicionales.
- Coste entre el 15 y el 30% superior al de los otros hormigones.

Estos hormigones tendrán un gran futuro, especialmente si los aditivos disminuyen su precio, dado que actualmente este es demasiado caro y su uso solo se justifica en aquellas obras en las que el hormigón tradicional puede presentar problemas por dificultad de relleno de moldes, ruido del vibrado, etc [6].

4.2. Ultrasonidos

4.2.1. Introducción

Un ultrasonido es una onda acústica o sonora cuya frecuencia es superior a 20 kHz, por encima del espectro audible del oído humano. Para producir un ultrasonido se genera un impulso eléctrico que provoca una vibración mecánica.

Los ultrasonidos son utilizados en diferentes ámbitos. Por ejemplo se puede destacar su uso en aplicaciones industriales (medición de distancias, caracterización interna de materiales, ensayos no destructivos, etc) o en medicina (ecografía, fisioterapia, etc).

Como se dijo en el párrafo anterior el uso de los ultrasonidos es una técnica muy útil para la caracterización interna de materiales. Esta herramienta se utiliza en el caso del hormigón y del mortero ya que es muy sensible a los cambios microestructurales de estos materiales.

4.2.2. Tipos de onda

Las ondas de ultrasonidos son ondas elásticas que se mueven en materiales elásticos o viscoelásticos. Se considera un material elástico aquel que tiene la propiedad mecánica de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan. Los materiales viscoelásticos son aquellos que tienen tanto propiedades elásticas como viscosas cuando se deforman.

Hay dos tipos de ondas elásticas: las ondas de volumen que se propagan por el interior del cuerpo y las ondas de superficie que se propagan sobre la superficie de un cuerpo y son influidas por este.

Para ambos tipos de onda la frecuencia (f), que se mide en Herzios, está en función de la velocidad de onda (V_p) y la longitud de onda (λ) a través de la siguiente relación:

$$f = \frac{V_p}{\lambda} \rightarrow V_p = f \cdot \lambda$$

Por lo tanto se puede expresar V_p en función de f y λ , aunque también se puede hacer en función del número de onda (k) y la velocidad angular (ω) como se explica a continuación.

El k es una magnitud de frecuencia que indica el número de veces que vibra una onda en una unidad de distancia. Dado su carácter sinusoidal se suele expresar en radianes por metro en lugar de ciclos por metro. Sabiendo que un ciclo comprende 2π radianes, a partir de la definición de k se obtiene el número de onda circular:

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

La velocidad angular (w) es una medida de la velocidad de rotación. Se la define como el ángulo girado por unidad de tiempo:

$$w = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Por lo tanto:

$$V_p = f \cdot \lambda = \frac{w}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{k} = \frac{w}{k}$$

4.2.2.1. Ondas de volumen

Las ondas de volumen son aquellas que se propagan por todo el volumen del material donde se producen. Existen dos tipos de ondas de volumen en un material isótropo y homogéneo, como se puede ver en la figura 10:

- Ondas longitudinales (ondas-p): se propagan produciendo oscilaciones en el material en la misma dirección que se propagan. Son las ondas más rápidas.
- Ondas transversales (ondas-s): se propagan produciendo movimientos perpendiculares a su dirección de propagación en el material del medio por el que se transmiten.

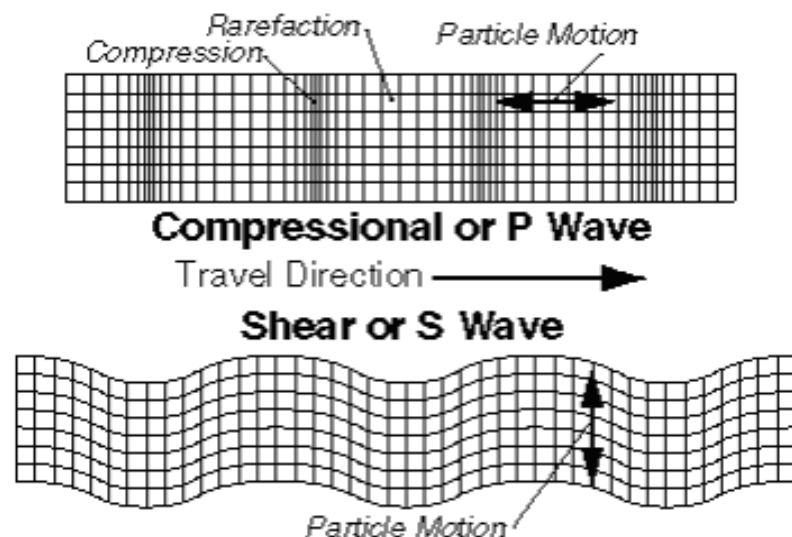


Figura 10. Ondas de volumen.

4.2.2.2. Ondas de superficie

De las ondas de superficie, la más importante es la onda de Rayleigh, de la que se muestra un ejemplo en la figura 11. Esta onda se propaga en paralelo a la superficie libre con una velocidad de aproximadamente el 90% de la velocidad de la onda-s, provocando un movimiento de partículas elíptico [7].

Rayleigh Wave

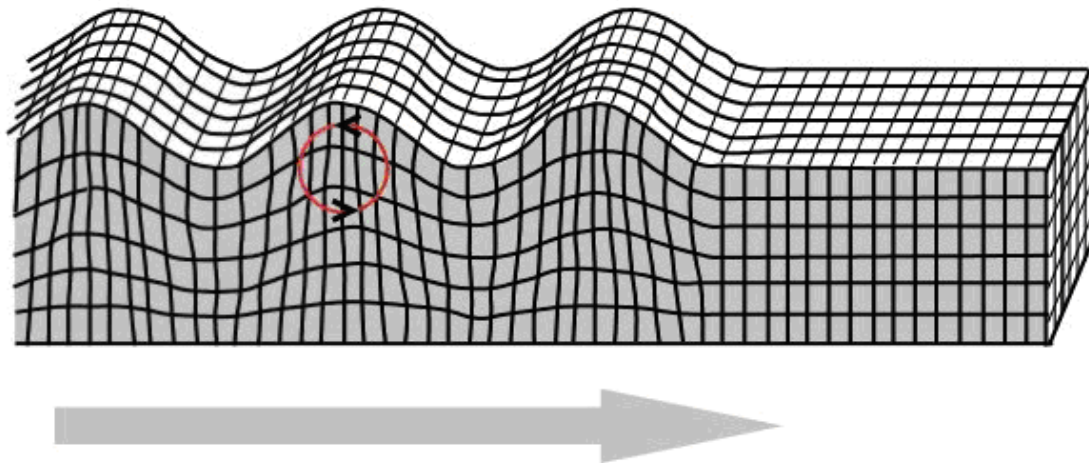


Figura 11. Onda de Rayleigh.

4.2.3. Caracterización del hormigón y mortero

Como se dijo anteriormente las técnicas de ultrasonidos son utilizadas para el estudio de los cambios microestructurales del hormigón o del mortero. En este tipo de aplicaciones se suele utilizar la onda-p ya que al ser la más rápida se tiene la certeza de que será la onda detectada por el receptor.

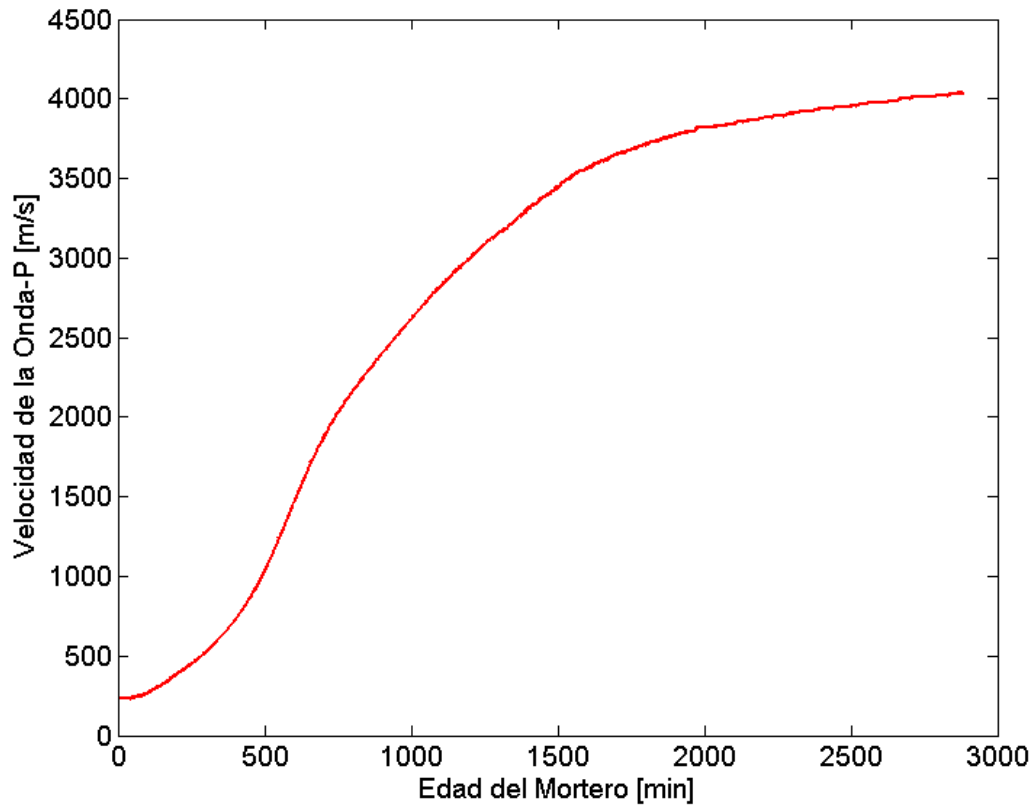


Figura 12. Curva de velocidad de la onda-p en función del tiempo para una mezcla de mortero.

La figura 12 muestra un ejemplo de la velocidad de la onda-p en función del tiempo para una mezcla de mortero. Se puede ver como la velocidad va aumentando a medida que se endurece el mortero ensayado. Al principio de la curva, el valor de la velocidad de propagación está principalmente dominado por la cantidad de aire que haya en la mezcla, pero cuando los productos de hidratación comienzan a aparecer, el mortero se va endureciendo y la velocidad aumenta. Estas curvas suelen tener forma de “S”, lo cual indica que después de la fase de suspensión hay un aumento rápido del endurecimiento cuando, los productos de hidratación aparecen y empiezan a interconectarse durante la fase del fraguado. Después de esta fase el hormigón sigue ganando dureza en la fase de endurecimiento.

La velocidad de propagación de la onda-p esta estrechamente relacionada con las propiedades mecánicas del medio en el que viajan. Para un medio isótropo y homogéneo la velocidad de la onda-p seguirán las siguientes relaciones:

$$\text{Sólidos:} \quad V_p = \sqrt{\frac{f(v) \cdot E_d}{\rho}}$$

$$\text{Líquidos: } V_p = \sqrt{\frac{K_d}{\rho}}$$

Donde:

- V : velocidad de propagación de la onda.
- ν : coeficiente de Poisson.
- E_d : módulo de elasticidad.
- ρ : densidad.
- K_d : módulo de Bulk.

Se ha dado la formula de la velocidad de propagación tanto en medio sólido como en medio líquido ya que cuando el hormigón o el mortero se encuentran en estado fresco presenta las dos fases en su composición. Las proporciones de una fase u otra dependen de varios factores como son el tiempo desde que fue mezclado o su composición, pero generalmente, se puede decir que es fluido al principio y, cuando se empieza a fraguar, pasa a fase sólida.

Los cambios en las velocidades que se irán produciendo en el caso concreto del hormigón o mortero son debidos principalmente al aumento del módulo de elasticidad cuando el cemento se va fraguando, ya que las variaciones de densidad y del coeficiente de Poisson son pequeñas durante este proceso. Por lo tanto, si se conociesen la densidad y el módulo de Poisson, teóricamente con la velocidad de propagación se podría calcular el módulo de elasticidad; pero esto no es posible ya que el hormigón o el mortero no son materiales homogéneos [8].

Las técnicas de ultrasonidos se usan para la caracterización del hormigón y mortero en aplicaciones como el estudio del fraguado. Varios parámetros son utilizados como indicadores del principio o del final del fraguado:

- Inicio del fraguado:
 - Tiempo del máximo gradiente (T_{MG}). Este tiempo se calcula en la curva del gradiente de la velocidad de la onda-p. En diversos estudios se considera como un buen parámetro para estimar el inicio de la percolación [9,10], momento relacionado con el inicio del fraguado [11].
 - Tiempo en el que la velocidad de la onda-p alcanza el valor de 1500 m/s (T_{1500}). En numerosos estudios se relaciona el tiempo donde la

velocidad de la onda-p vale 1500 m/s (que es aproximadamente la velocidad del sonido en el agua) con el inicio del fraguado. Además, se suele comparar este valor con T_{MG} para hallar una relación lineal entre ellos [9].

- Final del fraguado:
 - Tiempo en el que el gradiente de la onda-p alcanza el 20% del máximo gradiente (T_{20}). Este tiempo se calcula sobre la curva de gradiente de la onda-p y es un parámetro considerado como un buen indicador del final del fraguado [9].
 - Tiempo en el que la velocidad de la onda-p alcanza el valor de 2975 m/s (T_{2975}). Este tiempo es considerado como un buen indicador del final del fraguado [9].

Por lo tanto los parámetros T_{MG} y T_{1500} se calculan en la propia curva de velocidad de la onda-p, mientras que T_{20} y T_{2975} se calculan sobre la curva resultante al calcular el gradiente de la curva de velocidad de la onda-p. Las figuras 13 y 14, que se muestran a continuación son un ejemplo de estos parámetros en una curva de velocidad y del gradiente de la onda-p.

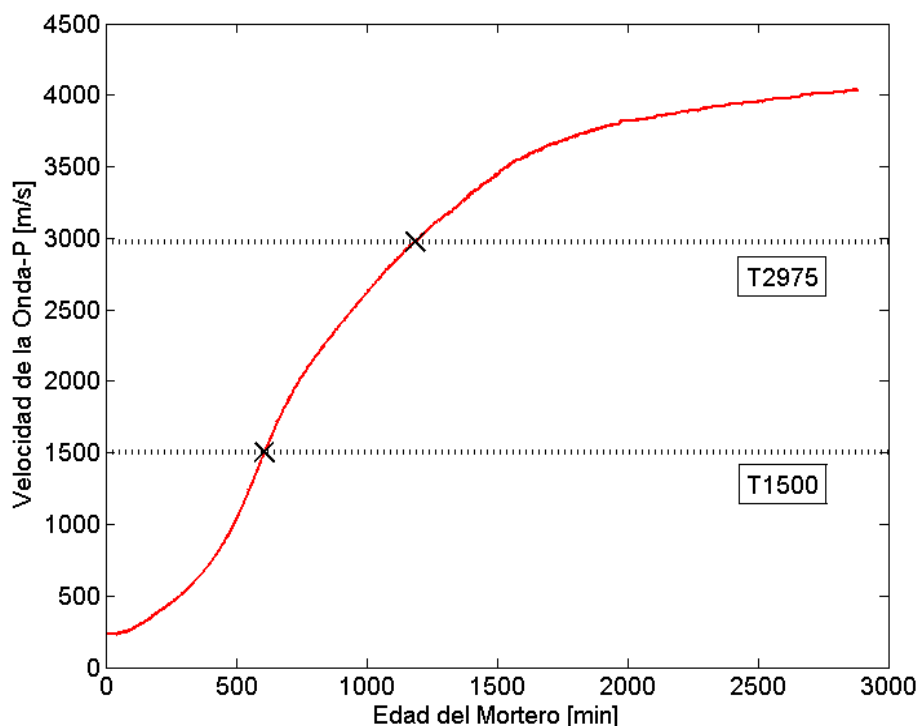


Figura 13. Parámetros T_{1500} y T_{2975} sobre una curva de velocidad de la onda-p.

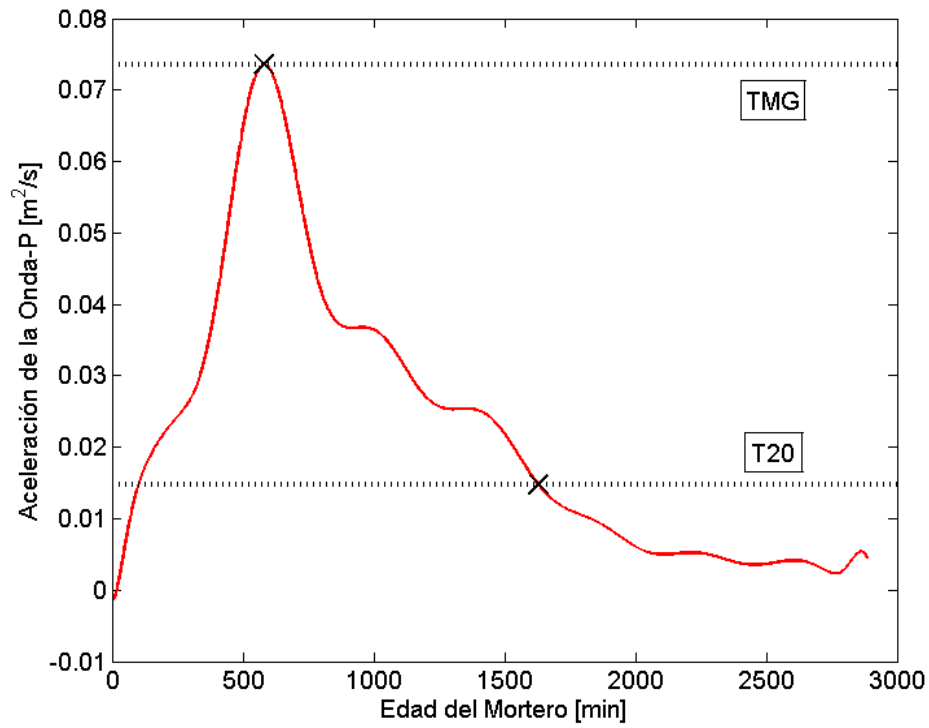


Figura 14. Parámetros T_{MG} y T_{20} sobre una curva del gradiente de la velocidad de la onda-p.

CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1. Materiales

Para la realización de este trabajo se prepararon diferentes mezclas de mortero. En todas ellas se usarón los mismos componentes, que son los que se describen a continuación:

- Arena normalizada según la norma EN 196-1
- Agua a $20 \pm 1^\circ\text{C}$
- Cemento Portland: CEM I 52.5N
- Superplastificador:
 - Glenium 51: policarboxilato éter, con el 35% de componentes reactivos
 - Glenium 27: policarboxilato éter, con el 20% de componentes reactivos
- Cenizas volantes

Para estudiar la influencia en la fase de fraguado durante el proceso de hidratación de las CV y el SP, las mezclas se organizan en 4 series. Las series van desde mezclas de mortero muy secas donde no se observa un comportamiento autocompactante y la mezcla apenas se podía compactar, hasta mezclas muy líquidas donde se observa gran cantidad de exudación. Las series analizadas tienen las siguientes cantidades de los componentes anteriormente citados:

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4
Cemento CBR CEM I 52.5 [g]	450	450	450	450
Agua [g]	202.5	202.5	202.5	202.5
Arena normalizada [g]	1350	1350	1350	1350
SP PCE Glenium 27 [g]	-	9.90	-	3.60→9.90
[% SP/C]		2.20		0.80→2.20
[% CR]		0.44		0.16→0.44
SP PCE Glenium 51 [g]	2.70	-	1.80→4.95	-
[% SP/C]	0.60		0.40→1.10	
[% CR]	0.21		0.14→0.385	
CV [g]	70→230	50→250	150	150
[C/P]	0.865→0.662	0.900→0.643	0.750	0.750

Tabla 3. Composición de las mezclas.



Tres importantes ratios deben tenerse en cuenta para todas las mezclas:

- A/C: es siempre el mismo para todas las mezclas:

$$\frac{A}{C} = \frac{\text{agua}}{\text{cemento}} = \frac{202.5g}{450g} = 0.45$$

- SP/cemento: representa el porcentaje de SP en función de la masa del cemento. Por ejemplo, si para la serie 3 todas las mezclas tienen 9.9 g de SP:

$$\frac{SP}{C} \% = \frac{\text{superplastificador}}{\text{cemento}} \% = \frac{9.90g}{450g} \cdot 100 = 2.20\%$$

- Cemento/material cementante: es el ratio entre la masa de cemento y la masa de cemento más CV. Por ejemplo, si en la serie 1 hay 150 g de CV:

$$\frac{C}{P} = \frac{\text{cemento}}{\text{polvo}} = \frac{450g}{450g + 150g} = 0.750$$



5.2. Procedimiento de mezcla

Todos los morteros preparados son mezclados tomando como referencia el procedimiento de la norma estándar EN 1015-2 [12], aunque este ha sido algo modificado para añadir las CV y el SP.

- 00:00. Arena, cemento y CV son colocados en el bol de mezcla
- 00:00 – 00:30. Mezclado a baja velocidad
- 01:00 – 01:30. Mezclado a baja velocidad al mismo tiempo que el agua es añadido lenta y progresivamente
- 01:30 – 02:00. Mezclado a baja velocidad
- 02:00 – 02:30. Parada en el mezclado y el SP es añadido
- 02:30 – 03:00. Mezclado a alta velocidad
- 03:00 – 04:30. Parada en el mezclado y limpieza de los lados del bol
- 04:30 – 05:30. Mezclado a alta velocidad

5.3. Métodos de ensayo

5.3.1. Ensayos de ultrasonidos

5.3.1.1. Dispositivo de ultrasonidos IP8

Las pruebas de ultrasonidos han sido realizadas con el dispositivo de ultrasonidos IP8. Para la realización de estos ensayos se mezcla y se coloca una muestra de mortero en diferentes moldes del IP8 que emite pulsos a través del emisor y mide el tiempo que tardan en ser recibida la señal por el receptor. El objetivo de esta prueba es calcular los parámetros indicadores del fraguado del mortero: T_{MG} , T_{1500} , T_{20} y T_{2975} .

El dispositivo IP8 fue desarrollado por la compañía Ultra Test y consta de un ordenador conectado al controlador permitiendo la medida de 8 canales diferentes al mismo tiempo. Cada canal de medida está compuesto por un molde cilíndrico flexible de silicona, un emisor y un receptor. El molde puede albergar muestras cilíndricas de hormigón o mortero de 70 mm de ancho y 60 mm de alto, con un volumen máximo de 230 ml. El molde está preparado para poder fijar lateralmente un emisor y un receptor permitiendo el contacto directo entre estos y la muestra de hormigón o mortero.



Figura 15. Configuración del dispositivo IP8 para cuatro canales.

El IP8 trabaja con ondas-p, ya que éstas son las más rápidas. La frecuencia de resonancia que usa es de 25 kHz y está controlado por el software WinUltraSonic/IP8, el cual permite almacenar un máximo de 3600 medidas con diferentes tiempos posibles entre pulso y pulso y una precisión máxima de 0.1 μ s [10].

5.3.1.2 Procedimiento del ensayo

Para cada mezcla entre 3 y 4 diferentes canales del IP8 han sido utilizados. Con un bol normalmente hay suficiente mortero para cuatro canales, pero para algunas mezclas solo hay tres canales ya que, uno de los canales muestra resultados muy diferentes a los otros canales o porque algunas mezclas de la serie 1 o 2 tienen poca cantidad de CV y no hay suficiente material para 4 canales. Para asegurar un buen contacto y una alta calidad de las señales emitidas por el IP8 se rocía grasa de silicona en el interior del molde y en las superficies del emisor y del receptor antes de cada test. Una vez que el mortero es introducido en los moldes estos son aislados con una tapa de plástico para evitar una excesiva evaporación del agua del mortero.

En este trabajo cada ensayo de ultrasonido dura 48 h, con medidas del tiempo de tránsito cada 48 s, obteniendo el máximo número de medidas permitidas, 3600. Por la flexibilidad del molde la distancia entre el emisor y el receptor no puede ser conocida inicialmente, así que esta es medida al final del ensayo en el propio mortero endurecido con una precisión de 0.1 mm.

5.3.1.3. Velocidad de la onda-p

Conocido el tiempo que tarda la señal y la distancia entre emisor y receptor es posible calcular la velocidad de la onda-p. En el anexo A están las curvas de velocidad de la onda-p de todas las mezclas preparadas.

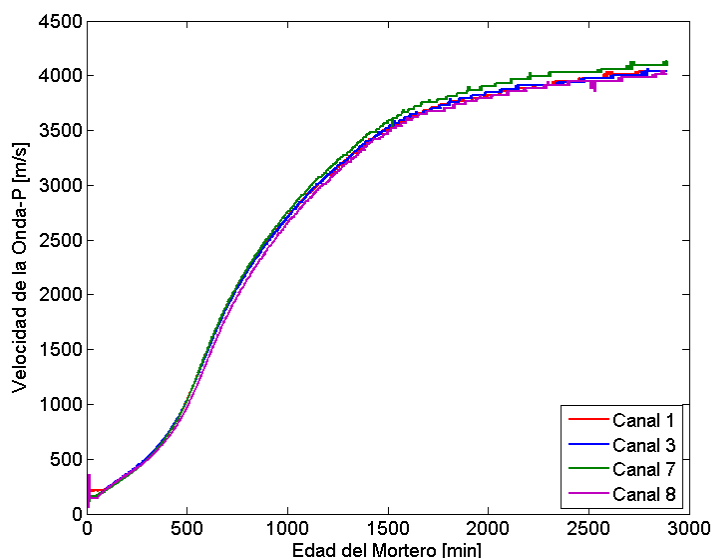


Figura 16. Ejemplo de velocidad de la onda-p calculada por el IP8.

Como se puede observar en la figura 16 las curvas de velocidad de los 4 canales usados tienen la forma de “S” esperada en estos casos; aunque suele haber diferencias entre las curvas obtenidas dependiendo de si las mezclas son secas, líquidas, del tipo de SP usado, de la cantidad de CV, etc.

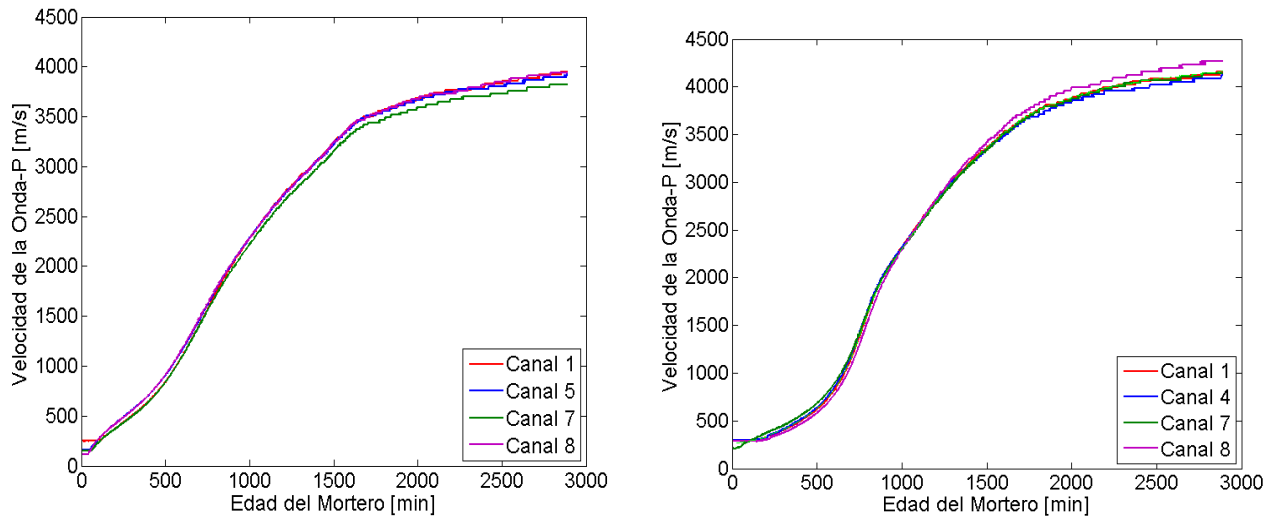


Figura 17. Dos ejemplos diferentes de velocidad de la onda-p.

En la figura 17 se puede observar dos curvas de la onda-p con formas diferentes, especialmente en la parte inicial. La curva de la izquierda tiene un crecimiento inicial, aproximadamente hasta los 1000 min, más suave; sin embargo para la curva de la derecha este crecimiento inicial tiene una forma más exponencial. Para la mezcla de la curva de la izquierda se usó G27 y para la de la derecha G51.

Como ya fue dicho, el principal objetivo de este trabajo es estudiar el proceso de fraguado en morteros autocompactantes en una serie de mezclas concretas. Para ello se desea calcular la curva del gradiente de la velocidad de la onda-p donde se obtendrán los parámetros T_{MG} y T_{20} . Sin ningún tratamiento sobre los resultados obtenidos directamente por el IP8 esto no es posible.

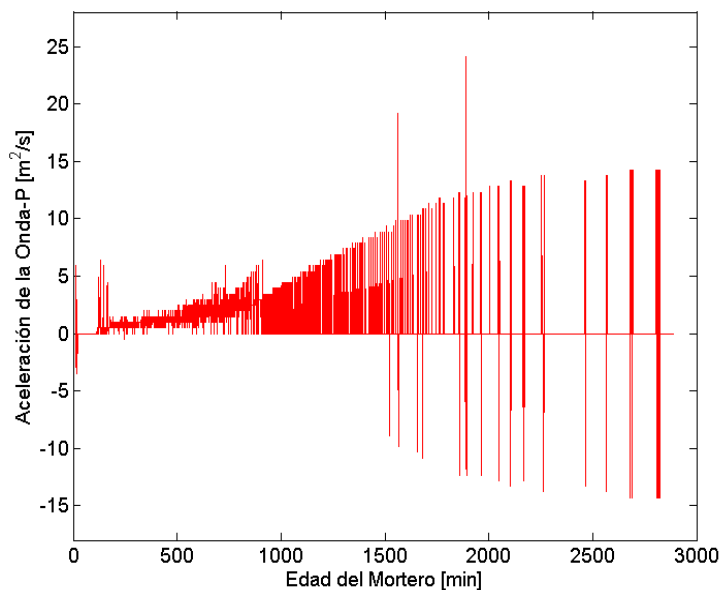


Figura 18. Ejemplo de curva de gradiente de la velocidad de la onda-p sin tratar.

Como es posible ver en la figura 18 la curva de gradiente consiste en una serie de saltos donde no es posible calcular los parámetros deseados. Esto es debido a varios factores detallados a continuación.

Precisión del IP8

El principal problema es que la precisión del IP8 es de 0.1 μs , lo que provoca que las curvas no sean continuas y que aparezcan importantes saltos cuando la velocidad cambia de valor, como se puede ver en la figura 19.

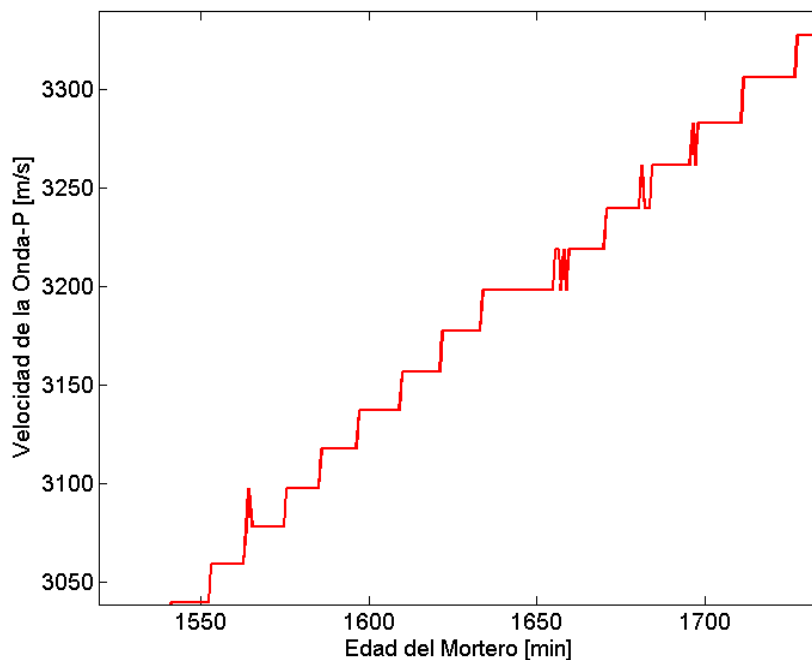


Figura 19. Ejemplo de saltos de la curva de velocidad de la onda-p.

Estos saltos aparecen por la precisión del IP8, como se explica en el siguiente ejemplo. Para las señales de una curva dada entre 2569 y 2678 min el IP8 está midiendo un tiempo de tránsito de 13.3 μs . Si la distancia medida entre emisor y receptor es de 50 mm la velocidad será la siguiente:

$$V = \frac{S}{T} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{13.3 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 3759 \text{ m/s}$$

Cuando el mortero se está endureciendo las señales son cada vez más rápidas, pero el siguiente tiempo que puede medir el IP8 es 13.2 μs , por lo que la velocidad tendrá el siguiente valor:

$$V = \frac{S}{T} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{13.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 3788 \text{ m/s}$$

Como se puede observar la diferencia entre dos valores de velocidad consecutivos, cuando esta cambia, es importante. La verdadera curva de velocidad de la onda-p crece de forma continua, por lo que en un momento dado su valor estará entre medias de dos posibles valores de velocidad calculados a partir del tiempo de tránsito. Cuando esto sucede, suelen aparecer algunos picos, porque el IP8 a veces medirá un tiempo y otras veces otro. En el ejemplo anterior, con 13.3 y 13.2 μs , hasta que cambia definitivamente la velocidad aparecen una serie de picos que se muestran a continuación en la figura 20.

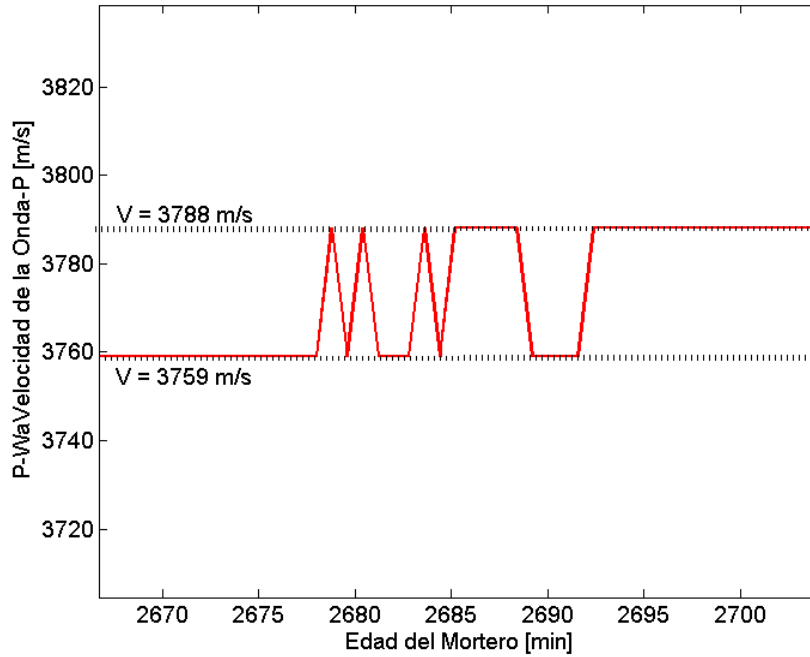


Figura 20. Ejemplo de picos alrededor de dos posibles valores de la curva de velocidad de la onda-p.

Los saltos entre los distintos valores de la velocidad serán cada vez mayores según pase el tiempo ya que, el tiempo de transito es cada vez menor y este actúa como divisor en la ecuación para calcular la velocidad. Por ejemplo, para los resultados de la mezcla anterior, entre los minutos 115 y 116 el tiempo de transito cambia de 227.2 a 226.2 μs (al principio el tiempo de transito cambia dando a veces saltos mayores que 0.1 μs) por lo que sus velocidades valen:

$$V_{115} = \frac{S}{T} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{227.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 220 \text{ m/s} \quad V_{116} = \frac{S}{T} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{226.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 221 \text{ m/s}$$

Esto quiere decir que entre los minutos 115 y 116 la diferencia de velocidad es la siguiente: $221 - 220 = 1 \text{ m/s}$ y entre los minutos 2678 y 2679 la diferencia de velocidad es de: $3788 - 3759 = 29 \text{ m/s}$ (incluso cuando la diferencia en el tiempo de transito en el segundo caso es de solo 0.1 μs y en el primer caso es 10 veces mayor, 1.0 μs). Estos picos y saltos hacen que sea imposible calcular el gradiente de la curva de la velocidad de la onda-p.

Picos inesperados

A veces en los resultados calculados a partir del tiempo de tránsito medido por el IP8 aparecen valores de velocidad extremadamente altos. Ellos pueden aparecer por diversas razones: un problema puntual en los cables o en los transmisores, una vibración externa que se produce en el mismo instante en el que un canal está midiendo y el receptor de este canal detecta esta vibración y no la señal real, etc. Cuando esto pasa se cambian manualmente estos valores por el siguiente valor ya que en realidad no están midiendo un cambio real en la microestructura del mortero y podrían causar cambios en los valores de los parámetros buscados. Además provocan que el tiempo de cálculo de estos parámetros sea mayor.

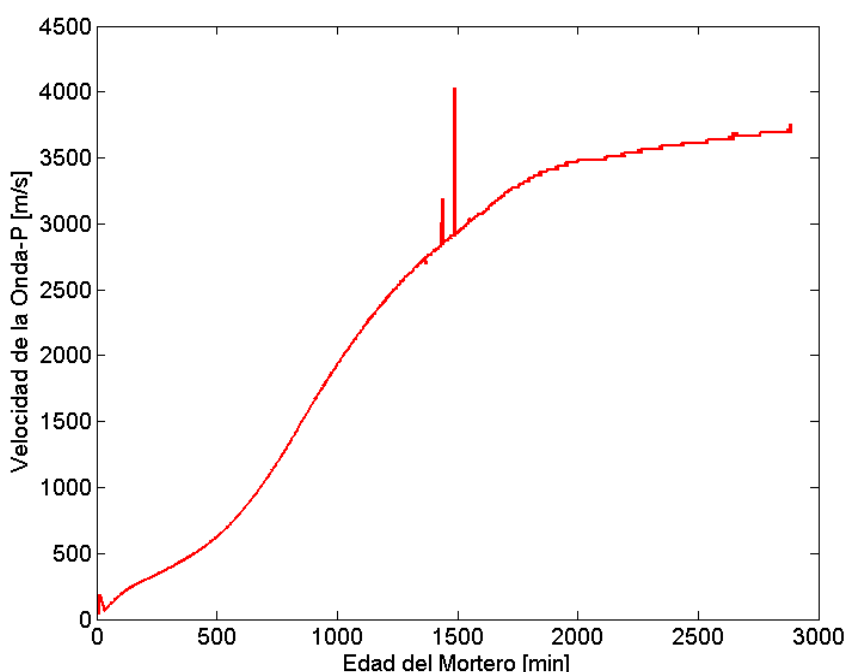


Figura 21. Ejemplo de valores inesperados muy altos en la curva de velocidad de la onda-p.

La figura 21 muestra valores muy altos de velocidad que raramente aparecen. Sin embargo, picos más pequeños sí suelen aparecer en estas curvas, como por ejemplo que un punto o grupo de puntos presente un valor diferente que el que tienen los puntos de alrededor o cuando un punto tiene un valor mayor de un escalón que el valor de los puntos que tiene cerca. Cuando esto pasa a estos puntos se les da el valor del siguiente punto.

Algunos ejemplos de este tipo de picos se muestran en la figura 22 con su correspondiente corrección:

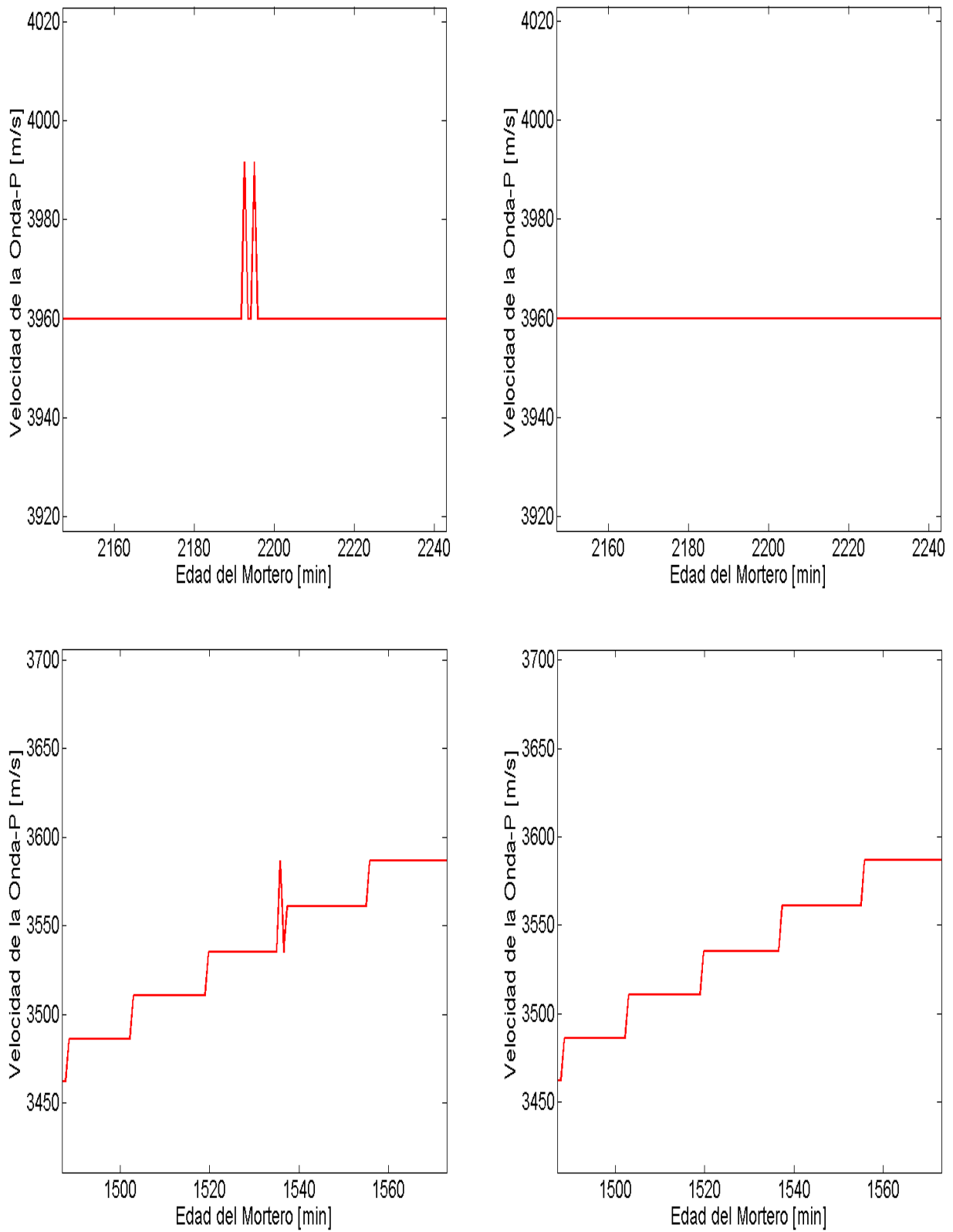


Figura 22. Ejemplo de picos inesperados y su solución.

Parte inicial de la curva de velocidad de la onda-p

Algunas adaptaciones se suelen hacer también a la parte inicial de las curvas de velocidad (hasta 150-200 min aproximadamente) ya que esta parte de la curva suele ser muy irregular y su forma depende del canal del IP8 usado. Esto es debido a que al principio la señal es muy débil por lo que el ratio entre la señal y el ruido es pequeño, lo que provoca que el IP8 muchas veces detecte ruido y no la verdadera señal. Por este motivo, en esta parte aparecen muchos picos e irregularidades. Este comportamiento alarga el tiempo de cálculo posterior y para evitar esto, esta parte de la curva se suele cambiar manualmente a una línea recta como se ve muestra en la figura 23:

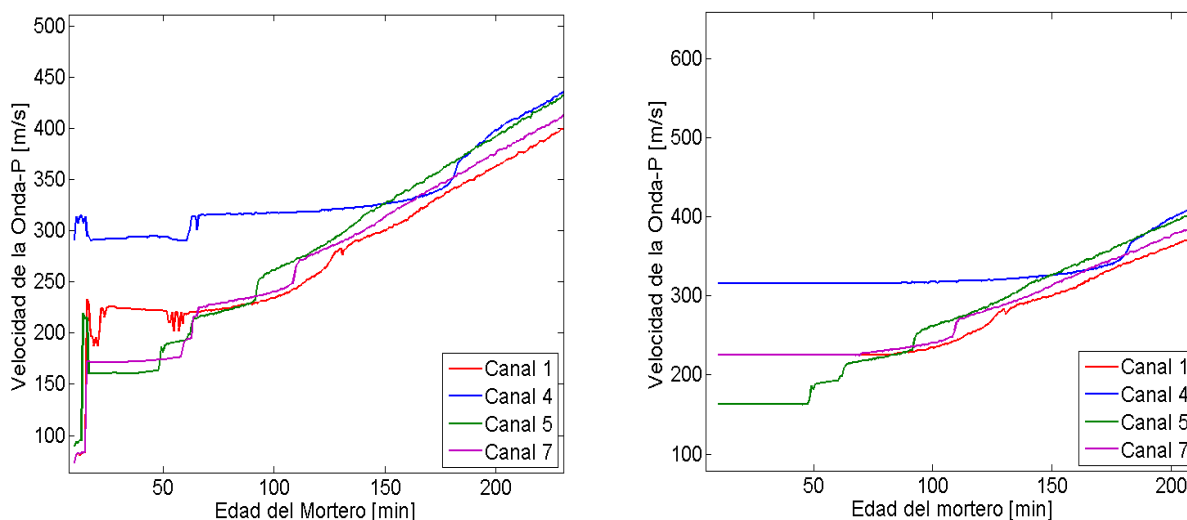


Figura 23. Ejemplo de inicios de curvas de velocidad de la onda-p y sus soluciones.

5.3.1.4. Tratamiento de los resultados

Para tratar de evitar estos problemas, se aproxima una función polinómica a los resultados de la velocidad de la onda-p calculados directamente a partir del tiempo de tránsito medido por el IP8, a través de un algoritmo realizado con Matlab. Este algoritmo fue desarrollado por Bram Desmet y ya se viene usando para este tipo de cálculos.

El orden del polinomio es elegido automáticamente por el algoritmo en función del error calculado por mínimos cuadrados y normalmente está entre 30 y 50, de hecho 50 es el máximo grado posible permitido por el algoritmo. Se eligió 50 como orden máximo ya que para órdenes más grandes que este valor los resultados varían muy poco, pero si no existiese este límite el algoritmo tardaría más tiempo en realizar los cálculos. De hecho ya a partir de orden 30 los resultados son muy similares. Esto se verá en el capítulo de resultados, ya que para comprobar el método se realizó una comparación de los resultados en función del orden del polinomio.

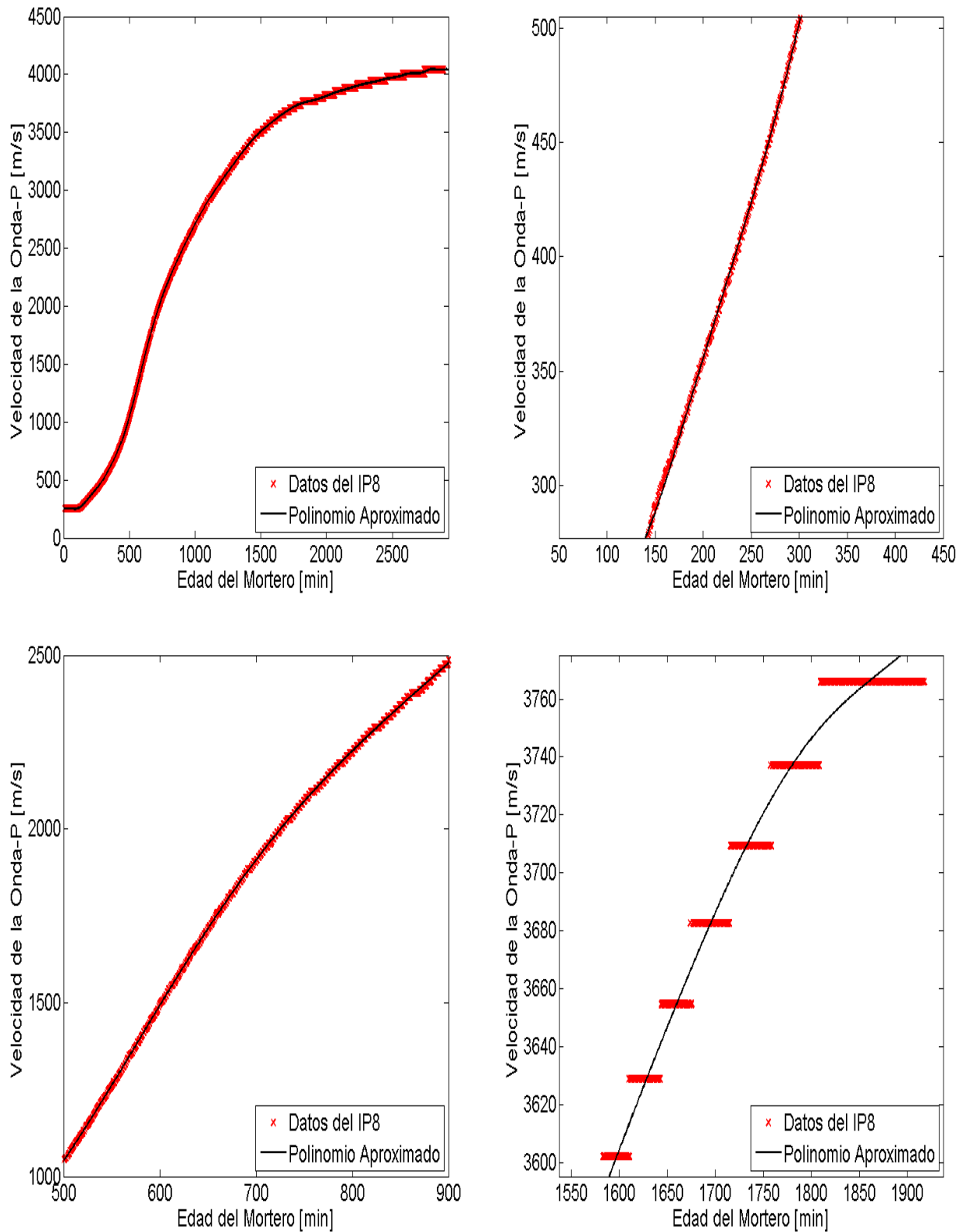


Figura 24. Ejemplo de aproximación del polinomio a los resultados de la velocidad de la onda-p.

En la figura 24 se muestra el ajuste de un polinomio a los resultados de la velocidad de la onda-p en diferentes tiempos. Se puede apreciar que en general el ajuste es bastante bueno. En el anexo A están las curvas del gradiente de la velocidad de la onda-p de todas las mezclas preparadas.

Una vez que se ha aproximado el polinomio del algoritmo a la curva de velocidad de la onda-p, se calculan los parámetros buscados para el estudio del proceso de fraguado T_{MG} , T_{1500} , T_{20} y T_{2975} . Para esto, primeramente se crea una curva (“canal media”) haciendo la media de las otras curvas y después se aproximan tantos polinomios como canales hayan sido usados por ensayo (3 o 4), más un polinomio para el canal media. T_{MG} y T_{20} se calcula en la curva de gradiente de la velocidad de la onda-p del “canal media”, mientras que T_{1500} y T_{2975} se calculan en la curva de velocidad de la onda-p del “canal media”. Es decir, todos los parámetros se calculan en el “canal media”, por lo que habrá un resultado de estos parámetros por mezcla.

A continuación se va a mostrar los resultados calculados para un ejemplo, una mezcla con 0.60% de SP G51 y 0.750 de C/P:

$T_{MG} = 579 \text{ min}$	$T_{1500} = 607 \text{ min}$	$T_{20} = 1499 \text{ min}$	$T_{2975} = 1141 \text{ min}$
----------------------------	------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Tabla 4. Ejemplo de resultados de T_{MG} , T_{1500} , T_{20} y T_{2975} .

A continuación, en las figuras 25 y 26, se muestran las curvas de velocidad de la onda-p y las de sus gradientes de todos los canales y del “canal media” de la mezcla anterior. Además, en las figuras 27 y 28, también se muestra las curvas del “canal media” con los parámetros indicadores del fraguado calculados.

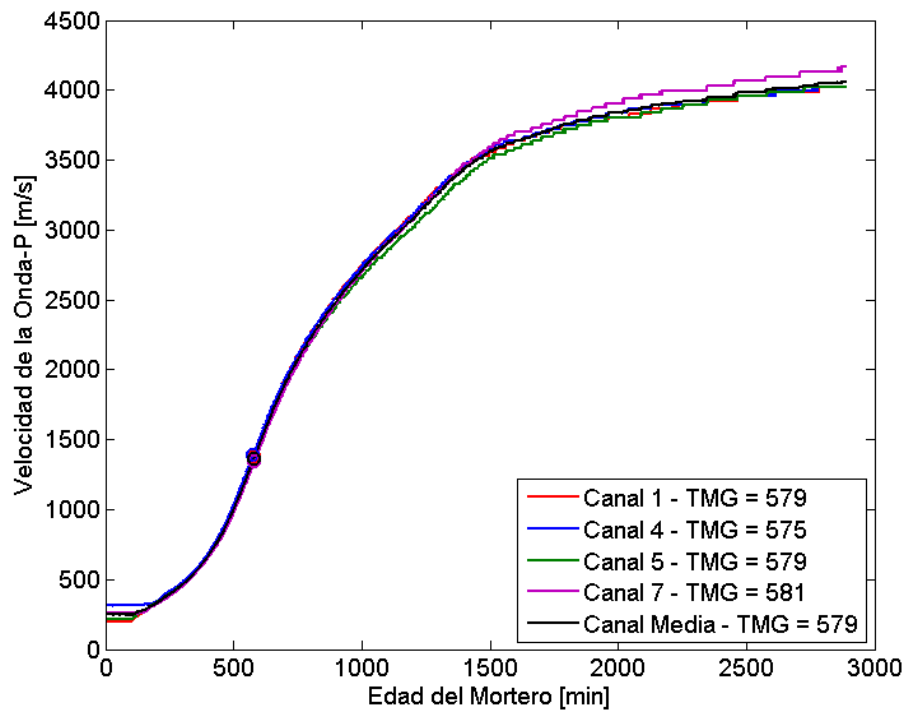


Figura 25. Curvas de velocidad de lo la onda-p y canal media de la mezcla ejemplo.

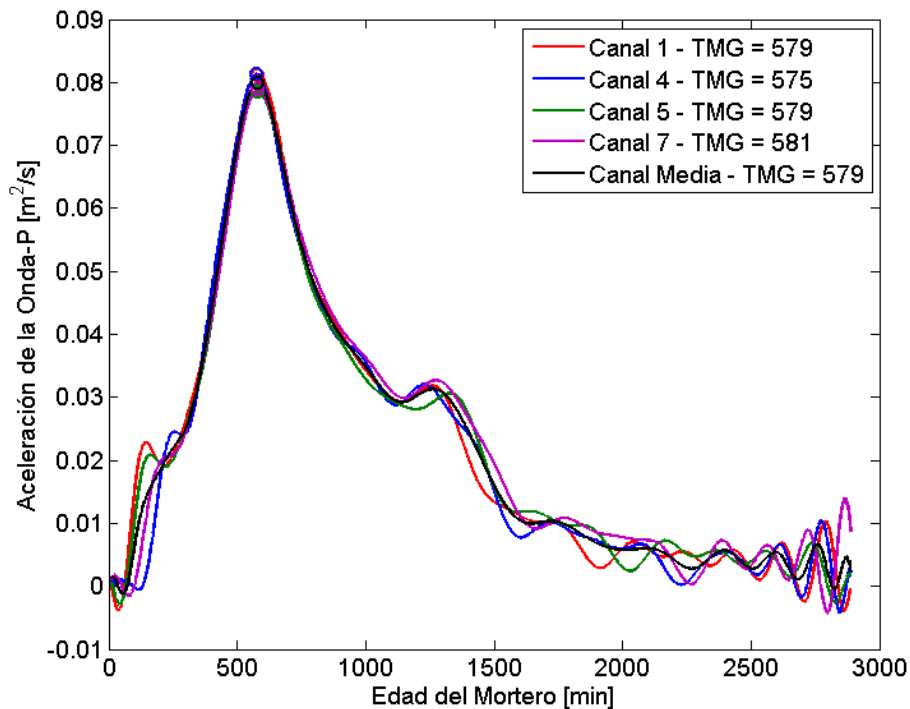


Figura 26. Curvas del gradiente de velocidad de lo la onda-p y canal media de la mezcla ejemplo.

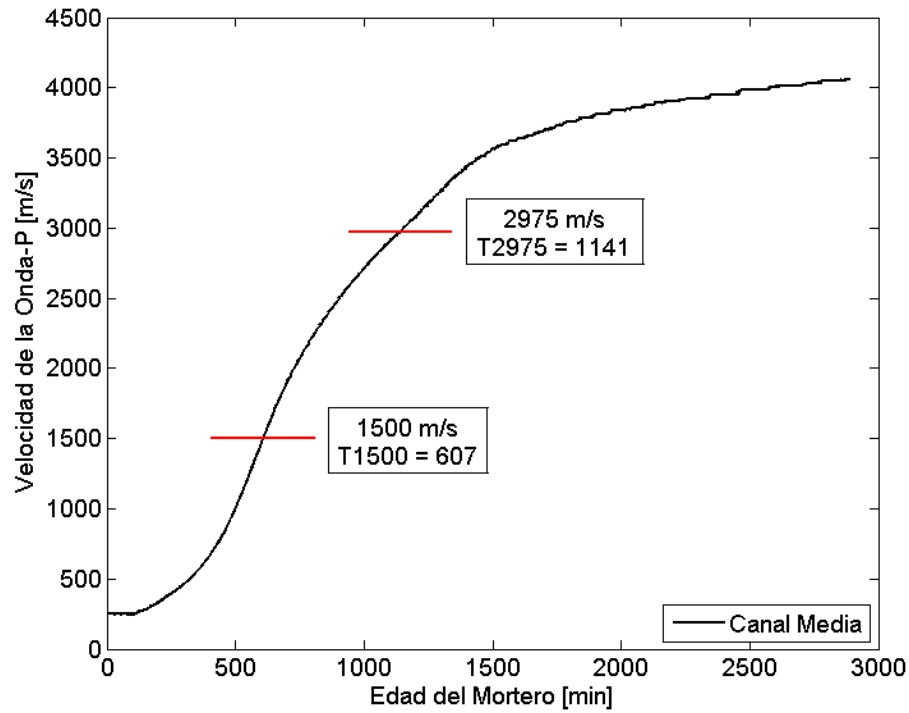


Figura 27. T_{1500} y T_{2975} en la curva de velocidad del canal media de la mezcla ejemplo.

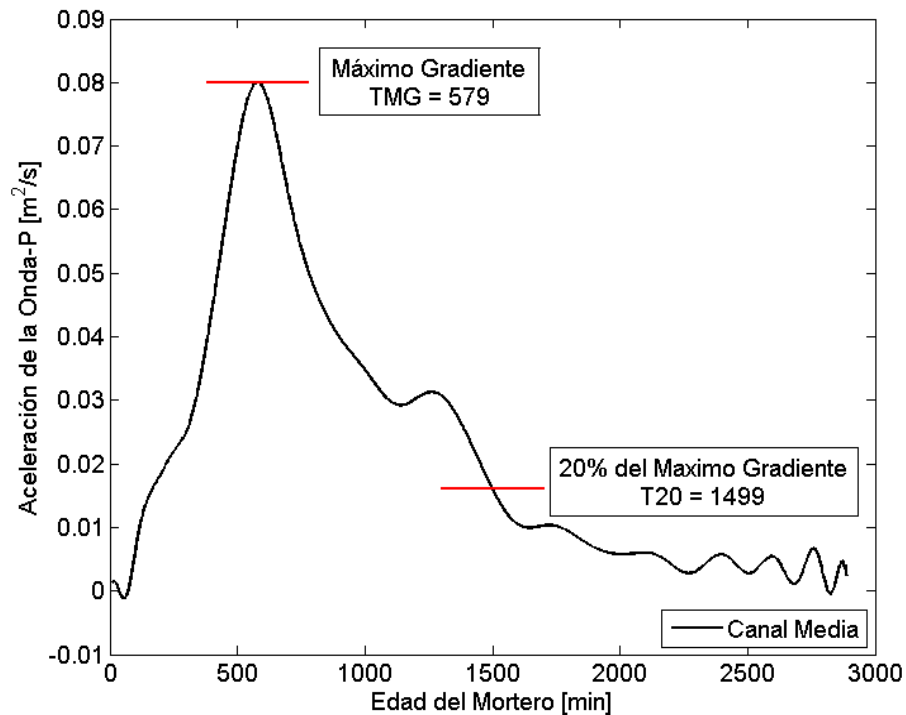


Figura 28. T_{MG} y T_{20} en la curva del gradiente de velocidad del canal media de la mezcla ejemplo.

5.3.2. Ensayos frescos

5.3.2.1. Procedimiento de los ensayos frescos

Los ensayos frescos sirven para caracterizar el mortero cuando acaba de ser mezclado. Para realizarlos se preparan dos lotes de mortero que después se mezclan durante 1 min. Se preparan dos lotes para tener suficiente material para realizar los siguientes ensayos: el ensayo de consistencia, el de contenido en aire y el de densidad. Los resultados de estos ensayos se relacionan con los resultados obtenidos en los ensayos de ultrasonidos, ya que las cantidades de SP y CV modifican las propiedades del mortero en estado fresco.

5.3.2.2. Ensayos de consistencia

Dos diferentes ensayos se realizan para medir la consistencia de las mezclas de mortero: el “slump flow” y el “flow table”. La prueba “slump flow” no está hecha de acuerdo a ninguna norma estándar ya que todavía no existe un estándar de este tipo de pruebas para mortero. Sin embargo, la prueba “flow table” está hecho de acuerdo a la norma estándar EN 1015-3 [13].

Estas pruebas están principalmente dominadas por la dispersión de los granos de cemento al igual que el proceso de fraguado, así que sus resultados son utilizados para relacionar la fluidez de la mezcla con los resultados del parámetro T_{MG} indicador del inicio del fraguado.

Para hacer estas pruebas se introduce el mortero recién mezclado y bien compactado en un molde troncocónico (60 mm de alto, 100 mm de diámetro interno en la parte inferior y 70 mm de diámetro interno en la parte superior), que se sitúa en el centro de la mesa de medidas. Después de esto se retira el molde con lo que el mortero se expande por la mesa. Cuando este termina de expandirse se mide el diámetro del mortero en dos direcciones perpendiculares con una precisión de 0.1 mm, obteniendo el resultado de la prueba llamada “slump flow”.

Después de obtener este resultado se somete al mortero a 15 impactos de igual potencia, a una frecuencia aproximada de un impacto por segundo, con lo que se expande todavía más. De nuevo, cuando este termina de expandirse se mide el diámetro en dos direcciones perpendiculares, con la misma precisión, obteniendo el resultado “flow table”.

Estas pruebas se realizan dos o tres veces por mezcla con lo que se obtienen entre 4 o 6 resultados (dos por cada prueba ya que se mide el diámetro en dos direcciones) para ambas pruebas. Los resultados de todas estas pruebas se muestran en el anexo B, y el resultado final utilizado en el capítulo 6 de este trabajo es la media de todos ellos.

Es importante destacar que el valor mínimo que se puede obtener en esta prueba es 100 mm, ya que es el diámetro inferior del molde, y el máximo es 300 mm, ya que es el

diámetro de la mesa de medidas. En la figura 29 se muestran algunos ejemplos de cómo se realizan estos ensayos.

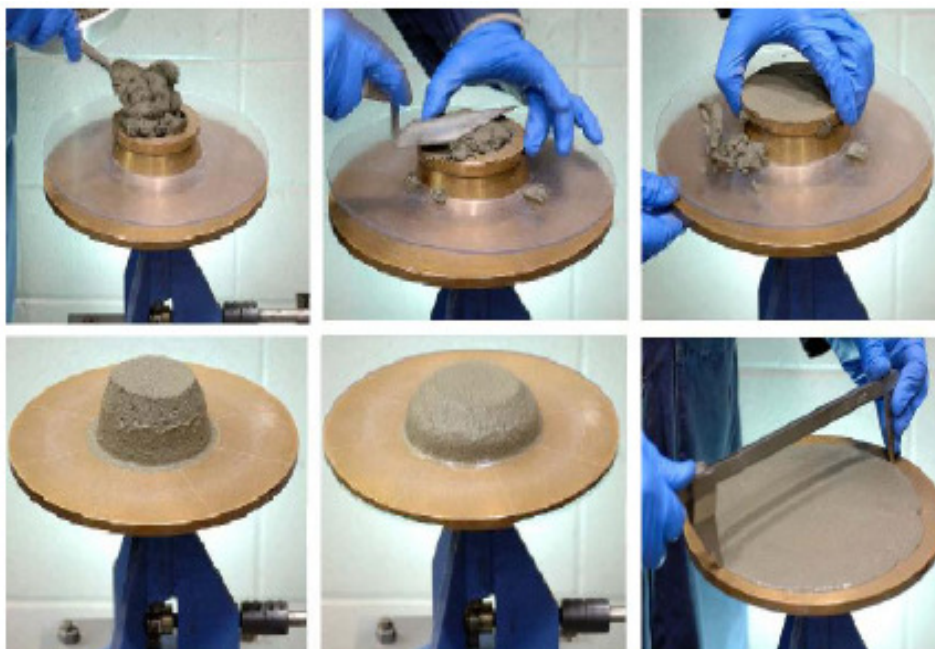


Figura 29. Procedimiento de las pruebas “slump flow” y “flow table”.

5.3.2.3. Ensayo de contenido en aire y de densidad

Estas dos pruebas son hechas para tener dos parámetros más relacionados con la dispersión de los granos de cemento, pero no están directamente relacionadas con los tiempos de fraguado estudiados en este trabajo. Ambos resultados están muy relacionados entre si ya que cuanto menos aire haya en la mezcla más densa será, por lo que existe una relación inversa entre ambos parámetros.

Prueba de contenido en aire

Esta prueba es hecha de acuerdo a la norma estándar EN 1015-7 [14]. Para realizarla, se fija un recipiente lleno de mortero recién preparado a una cámara de presión. Después se hace circular agua entre el recipiente y la cámara para el eliminar el aire que haya en el interior. Una vez que no hay aire en el interior se aplica una presión externa que provoca una reducción de volumen del contenido del recipiente. Como se ha dicho, en el recipiente hay agua y mortero (compuesto por productos sólidos, agua y aire), por lo que esta reducción de volumen solo se debe a la reducción del volumen del aire, ya que es el único componente en el recipiente que es compresible.

A través de esta reducción de volumen en el interior, y por lo tanto de diferencia de presión causada por el contenido de aire en la mezcla, la cámara de presión mide el resultado de la prueba llamada “air content”.

En la figura 30 se muestra la cámara de presión utilizada para realizar este ensayo.



Figura 30. Cámara de presión utilizada en la prueba “air content”.

Ensayo de densidad

Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma estándar EN 1015-6 [15]. Para realizarla simplemente se llena un recipiente de 1 l de capacidad de mortero bien compactado y se pesa en una balanza de 0.1 g de precisión. Por lo tanto, con la masa y el volumen se puede calcular la densidad.

El problema de esta prueba es que las diferencias entre las densidades de las diferentes mezclas son muy pequeñas, y es difícil saber cuando el recipiente está perfectamente lleno. Para tratar de mejorar la prueba han sido utilizados dos diferentes métodos:

- Primer procedimiento. Se usa para la primera y la segunda serie. Se llena el recipiente con mortero y cuando tiene aproximadamente la cantidad correcta se coloca un plato de cristal sobre él. Si toda la superficie del mortero y los bordes del recipiente están en contacto con el cristal, la cantidad de mortero en el recipiente se considera adecuada.
- Segundo procedimiento. Se usa para la tercera y la cuarta serie. Se llena el recipiente de mortero, y el sobrante de este se elimina con una paleta de superficie plana. El problema de este método es que la decisión final de aceptar la cantidad como adecuada es a través de una inspección visual, lo cual no es muy preciso.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. Validación del algoritmo

Primeramente, antes de la obtención de resultados, se comprueba el algoritmo en función del orden del polinomio tradicionalmente usado. Para ello se utiliza el algoritmo para calcular T_{MG} en cuatro curvas de referencia [16] con formas similares a las curvas obtenidas por el IP8 y donde el valor de T_{MG} es conocido. Las curvas de referencia no son continuas, es decir, tienen saltos para que sean más similares a las curvas del IP8. Estas curvas de referencia se muestran en la figura 31.

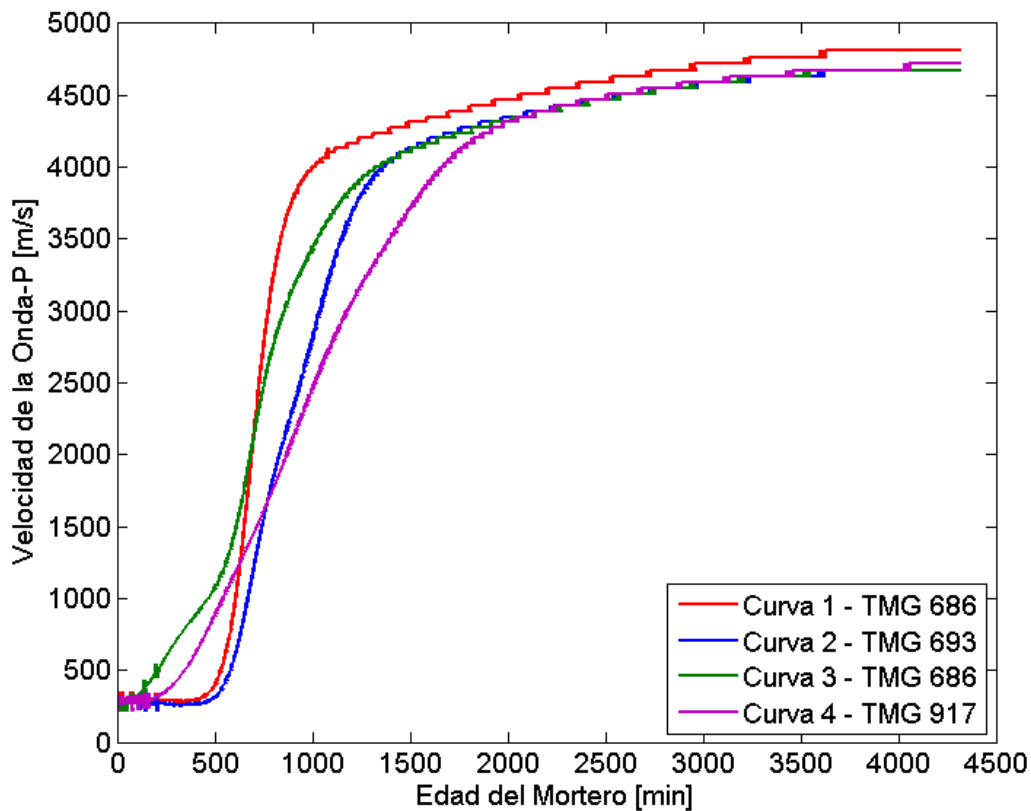


Figura 31. Curvas de referencia.

A continuación, en la figura 32, se muestran los resultados de T_{MG} calculados por el algoritmo de Matlab para las curvas de referencia en función del orden del polinomio, junto con el verdadero valor de T_{MG} de estas curvas representado por una línea recta horizontal. En el eje x está el orden del polinomio, que en este caso va de 10 a 80.

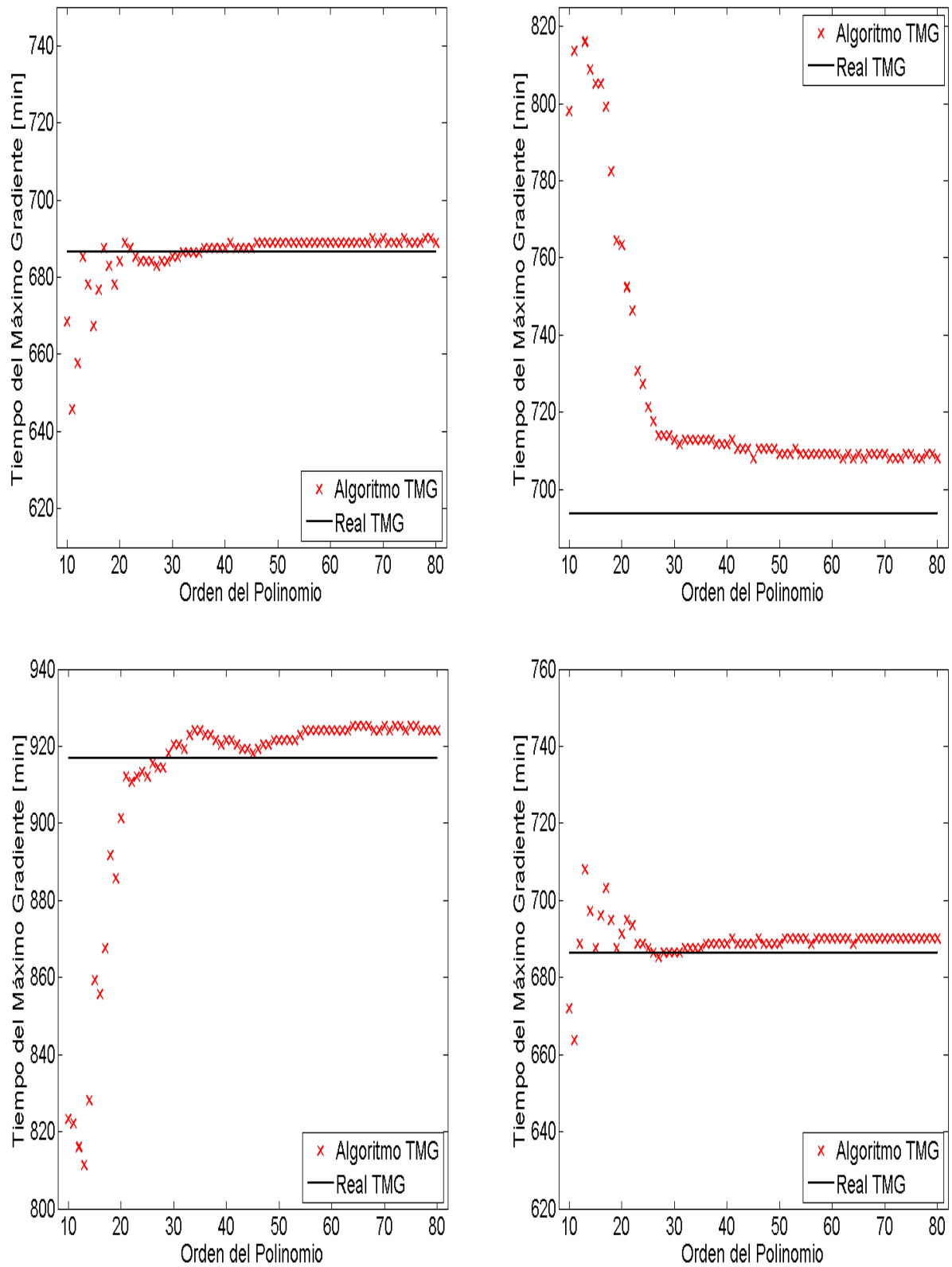


Figura 32. T_{MG} en función del orden del polinomio para las curvas de referencia.

Como se ve en la figura 32, para órdenes mayores de 30 el resultado cambia muy poco. Debido a esto, y para que haya algo de margen en los cálculos, se pone orden 50 de límite en el algoritmo.

Una vez visto que a partir de aproximadamente orden 30 del polinomio el grado de este no afecta mucho al resultado de T_{MG} , se va a comprobar el valor calculado de T_{MG} para orden 50 con el valor real de este parámetro en las curvas de referencia.

	T_{MG}			
	Curve 1	Curve 2	Curve 3	Curve 4
Orden 50	689	709	689	921
Valor real	686	693	686	917
Diferencia de tiempo	3	16	3	4
% Diferencia	0.44	2.31	0.44	0.44

Tabla 5. Comparación entre T_{MG} calculado por el algoritmo con orden 50 y el valor real de las curvas de referencia.

Las diferencias entre los tiempos son pequeñas, especialmente para las curvas 1,3 y 4 donde ni siquiera alcanzan el 1%. Para la curva 2 la diferencia es mayor, 2.3%, pero esta curva es más compleja que las demás, ya que tiene dos puntos de inflexión en la zona de crecimiento intenso (aproximadamente entre 500 y 1300 min) y las curvas del IP8 normalmente solo tienen un punto de inflexión en esta zona.

6.2. Resultados de la serie 1

6.2.1. Organización de la serie

En esta serie, como se mostró en la tabla 3, las cantidades de todos los componentes de las mezclas preparadas son las mismas excepto la cantidad de CV. Además, se utiliza 2.70 g (0.60% sobre la masa del cemento) de G51. Las mezclas preparadas contienen desde 70 a 230 g de CV en saltos de 20 g, aunque los resultados están representados en función del ratio C/P. Conviene destacar que cuanto más grande sea C/P significa que menos CV hay en la mezcla, y viceversa.

6.2.2. Estudio del proceso de fraguado

Resultados de los parámetros de fraguado

C/P	T_{MG}	T_{1500}	T_{20}	T_{2975}
0.662	751	773	1762	1302
0.682	709	734	1675	1255
0.703	667	687	1699	1255
0.726	655	676	1664	1214
0.750	622	645	1575	1159
0.776	592	636	1574	1158
0.804	579	616	1579	1146
0.833	550	578	1631	1194
0.865	527	553	1579	1086

Tabla 6. Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 1.

Como se puede ver en la tabla 6, todos los resultados que estudian el proceso de fraguado siguen la misma tendencia, que es la de reducir su valor cuando menos CV son añadidas a las mezclas. 0.865 es la última mezcla preparada ya que presentó mucha exudación cuando fue realizada, como la mezcla 0.833; sin embargo, en esta serie la exudación no afectó de manera notoria a los resultados.

Curvas de velocidad de la onda-p del canal media

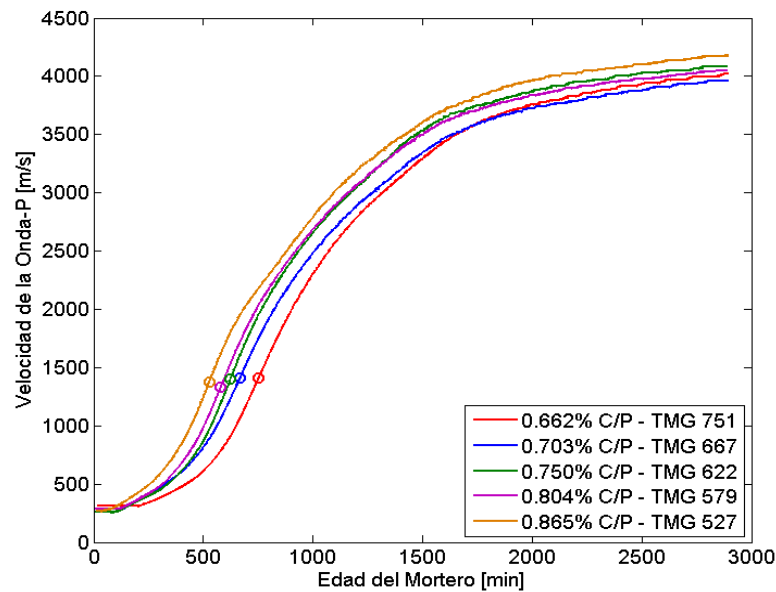


Figura 33. Curvas de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.662, 0.703, 0.750, 0.804 y 0.865 de la serie 1.

En la figura 33 se muestran las curvas de velocidad de 5 mezclas diferentes. Como se puede ver las curvas tienen la forma de “S” esperada y son muy parecidas entre ellas, con la diferencia de que, cuanto menos CV contienen, más a la izquierda están.

Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media

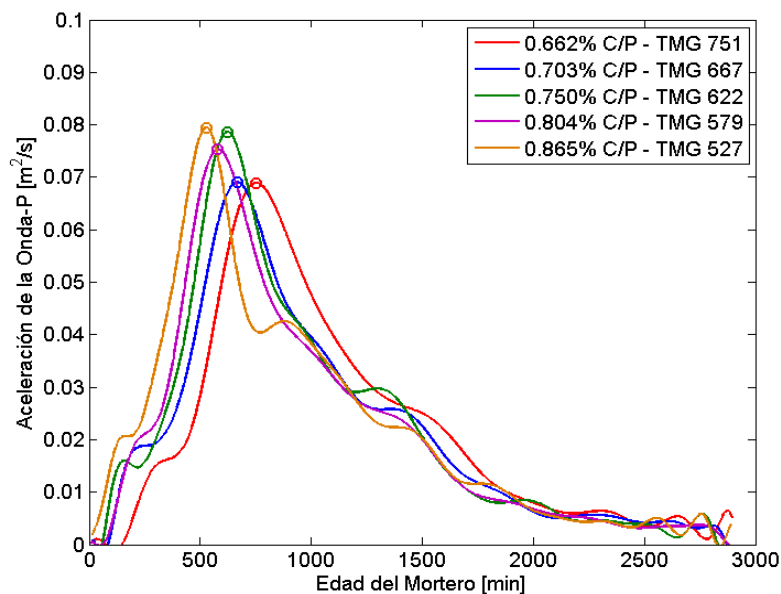


Figura 34. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.662, 0.703, 0.750, 0.804 y 0.865 de la serie 1.

En la figura 34 se muestran las curvas de gradiente de las mismas mezclas que en la figura 33. De nuevo, las curvas se mueven hacia la izquierda cuanto menos CV hay en ellas, y se puede observar claramente donde está el máximo gradiente.

Inicio del fraguado

Las diferencias entre los parámetros usados para medir el inicio del fraguado, T_{MG} y T_{1500} , son mostradas en la tabla 7:

C/P	0.662	0.682	0.703	0.726	0.750	0.776	0.804	0.833	0.865
$ T_{MG} - T_{1500} $	22	25	20	21	23	44	37	28	26
$\frac{ T_{MG} - T_{1500} }{T_{MG}} \%$	2.9	3.5	3.0	3.2	3.7	7.4	6.4	5.1	4.9

Tabla 7. Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 1.

Las diferencias entre los resultados de ambos parámetros en general no son grandes, de hecho, solo en 3 mezclas se supera el 5%. A continuación, en la figura 35, se representan en función del ratio C/P:

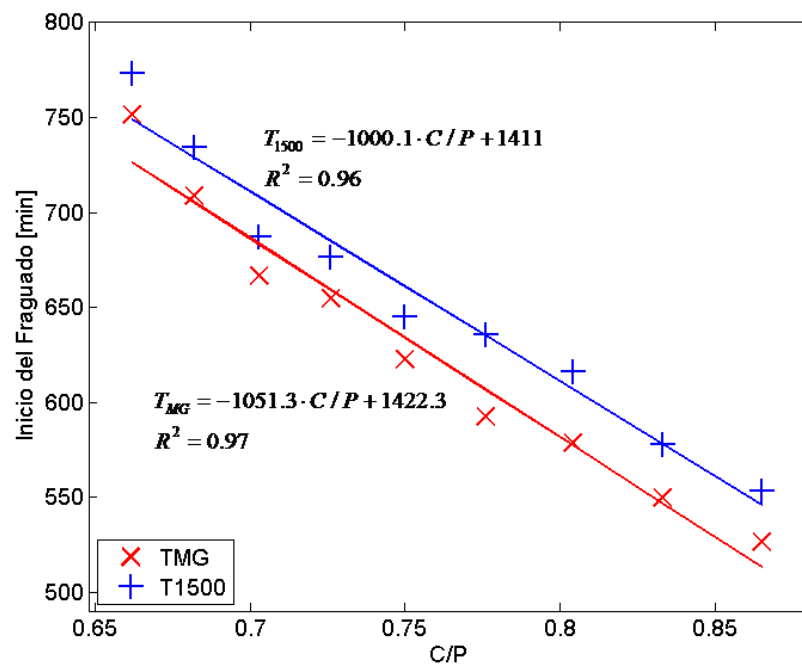


Figura 35. T_{MG} y T_{1500} de la serie 1.

Los resultados de la figura 35 muestran que el inicio del fraguado sucede antes cuando hay menos CV en las mezclas. Ambos métodos muestran resultados muy similares y siguen la misma tendencia por lo que para ambos resultados se han aproximado dos

líneas rectas, obteniéndose dos coeficientes R^2 muy elevados y con una pendiente parecida, mostrando la relación entre el tiempo de inicio del fraguado y el ratio C/P.

Para comprobar la relación existente entre los resultados de ambos métodos, se representa T_{1500} en función de T_{MG} , en la figura 36.

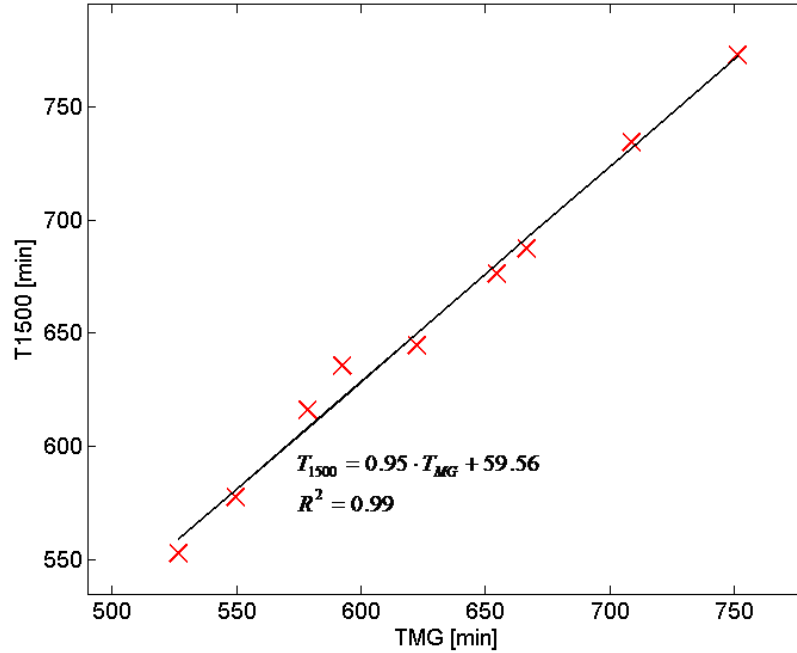


Figura 36. Comparación de T_{MG} y T_{1500} de la serie 1.

La aproximación lineal hecha en la figura 36 tiene un coeficiente R^2 muy alto, mostrando la relación que existe entre ambos parámetros.

Final del fraguado

Los resultados de T_{20} y T_{2975} usados para estudiar el final del fraguado se muestran a continuación en la tabla 8.

C/P	0.662	0.682	0.703	0.726	0.750	0.776	0.804	0.833	0.865
$ T_{2975} - T_{20} $	460	420	444	450	416	416	433	437	493
$\frac{ T_{2975} - T_{20} }{T_{20}} \%$	26.1	25.0	26.1	27.0	26.4	26.4	27.4	26.8	31.2

Tabla 8. Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 1.

Como es posible ver en la tabla 8, las diferencias entre los resultados de ambos métodos son importantes, de hecho, los valores de T_{20} son un 26.9% de media mayores que los de T_{2975} . En la figura 37 se representan ambos resultados en función del ratio C/P para ver si siguen la misma tendencia.

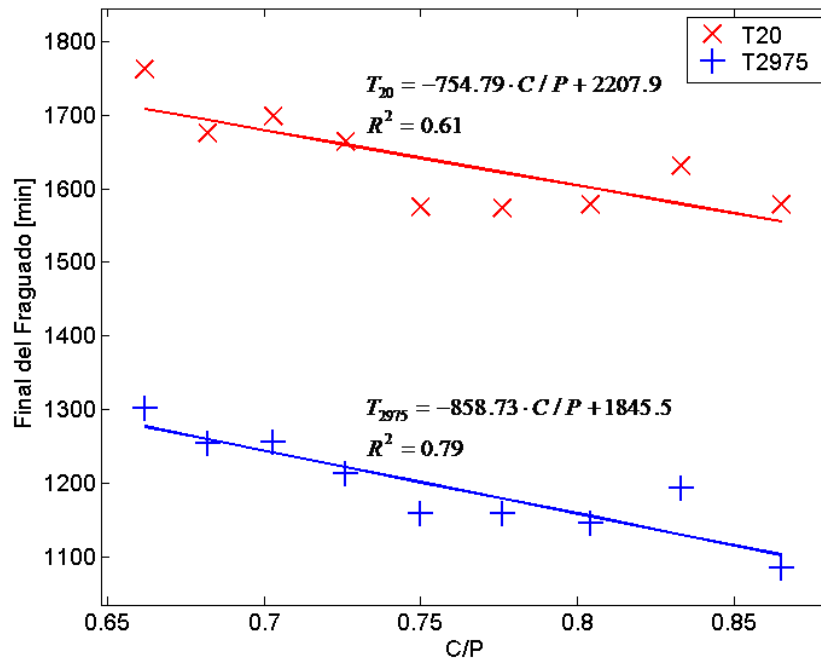


Figura 37. T_{20} y T_{2975} de la serie 1.

Ambos métodos muestran un decrecimiento del final del fraguado cuando hay menos CV en las mezclas, a pesar de que las diferencias entre sus valores son importantes. Dos líneas rectas han sido aproximadas a ambos resultados aunque los coeficientes R^2 obtenidos no son altos, especialmente para T_{20} . Para ver si existe una relación lineal entre ellos se representa T_{2975} en función de T_{20} en la figura 38.

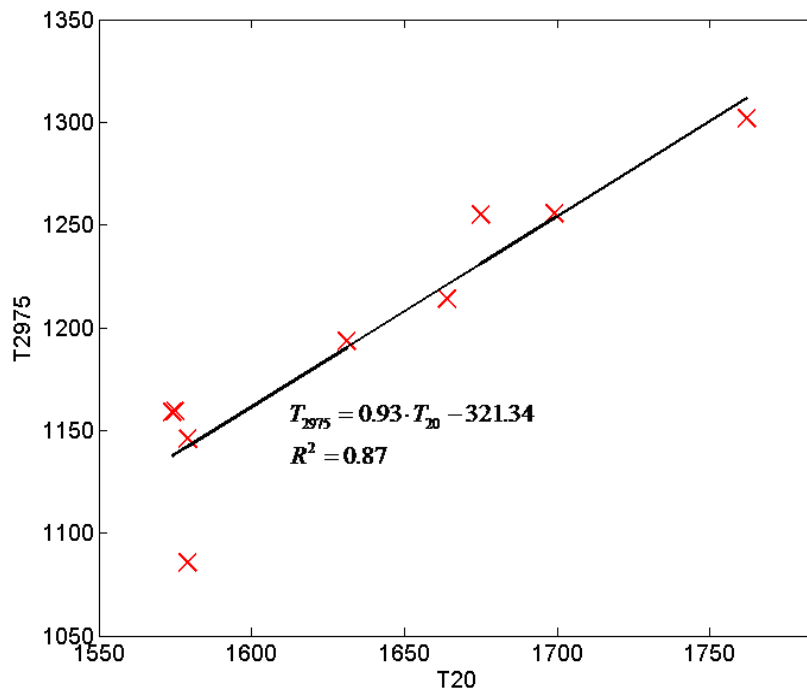


Figura 38. Comparación de T_{20} y T_{2975} de la serie 1.

La aproximación lineal hecha en la figura 38 tiene un coeficiente R^2 muy alto, mostrando la relación lineal que existe entre ambos parámetros.

Por lo tanto, los resultados de T_{MG} y T_{1500} muestran que el inicio del fraguado sucede antes cuando las mezclas contienen menos CV, al igual que pasa con los resultados de T_{20} y T_{2975} y el final del fraguado; por lo que podría decirse que el ratio C/P afecta de una forma similar a ambos procesos.

6.2.3. Ensayos frescos

Resultados de los ensayos frescos

C/P	SF	FT	AC	BD
0.662	100	147	6.2	2209
0.682	100	165	5.9	2205
0.703	134	199	5.1	2228
0.726	188	231	5.1	2236
0.750	223	255	5.2	2227
0.776	262	288	4.6	2223
0.804	270	287	2.5	2241
0.833	280	295	1.8	2292
0.865	278	298	1.7	2280

Tabla 9. Resultados de los ensayos frescos de la serie 1.

Ensayos de consistencia

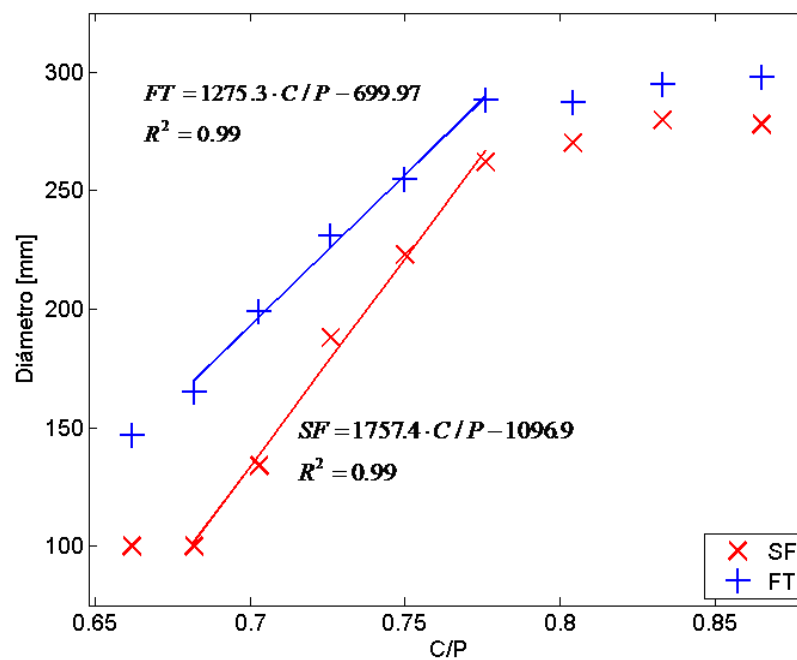


Figura 39. Ensayos de consistencia de la serie 1.

Como muestra la figura 39, ambos resultados muestran el mismo comportamiento. Como era esperado con menos CV las mezclas son más líquidas. En los resultados se pueden apreciar tres partes diferentes. En la primera parte, hasta la tercera mezcla 0.703, la cantidad de CV es demasiado grande para que el mortero pueda fluir por si mismo, por lo que el resultado de SF es el mínimo posible, 100 mm.

A partir de la mezcla 0.682, las mezclas empiezan a fluir por si mismas y a comportarse como mortero autocompactante. Desde la mezcla 0.682 hasta 0.776 hay un claro incremento lineal, de hecho, el valor del coeficiente R^2 es de 0.99 cuando se aproximan linealmente los resultados.

Después de la mezcla 0.776 se alcanza un punto de saturación y la fluidez de las mezclas permanece aproximadamente constante según los resultados de SF y FT. Por lo tanto la influencia de la cantidad de CV en la fluidez de las mezclas en esta serie es de 0.682 hasta 0.776.

Para tratar de ver la relación entre la fluidez de las mezclas y el tiempo en el que se inicia el fraguado, según el tiempo en el que se produce el máximo gradiente, en la figura 40 se representa T_{MG} en función de los resultados de SF y FT.

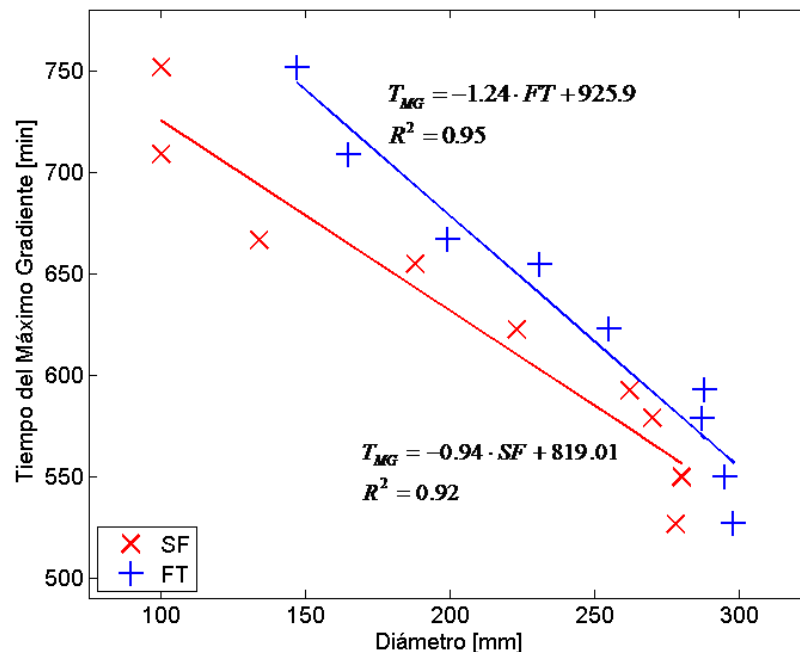


Figura 40. T_{MG} en función de la SF y FT de la serie 1.

Cuanto más líquidas son las mezclas, antes se produce el inicio del fraguado según los resultados de T_{MG} . Por lo tanto la relación entre la fluidez y el inicio del fraguado es inversa. Dos líneas rectas han sido aproximadas a los resultados anteriores obteniéndose elevados coeficientes R^2 .

Ensayos de contenido en aire y densidad

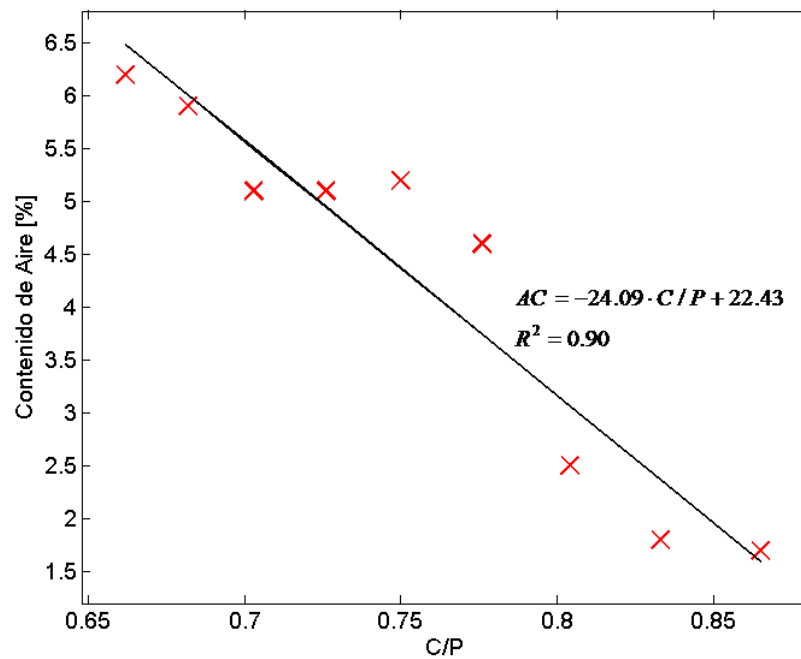


Figura 41. Contenido en aire de la serie 1.

La figura 41 muestra que el contenido en aire es más bajo cuando hay menos CV en las mezclas. Una línea recta ha sido aproximada a los resultados de AC con un alto coeficiente R^2 .

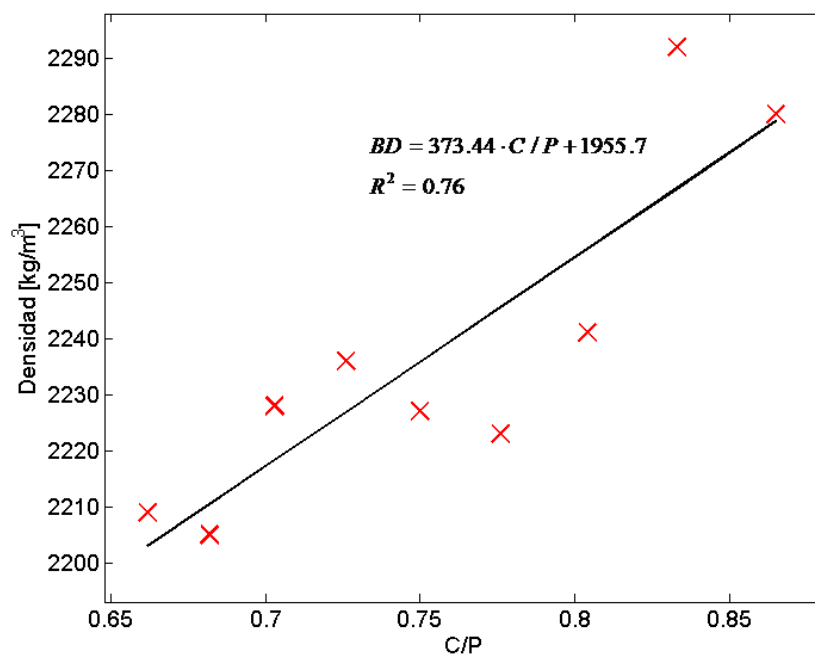


Figura 42. Densidad de la serie 1.

Los resultados del valor de la densidad de la figura 42 muestran algunos picos y puntos irregulares, pero la tendencia general de la curva es a aumentar la densidad cuando menos CV hay en las mezclas. En esta serie se usó el primer procedimiento para medir la densidad, detallado en el capítulo 5, pero cuando se ajusta una línea recta a los resultados se obtiene un coeficiente R^2 no demasiado alto. Esto es debido a que la prueba de densidad no es considerada suficientemente precisa especialmente teniendo en cuenta que la diferencia máxima entre dos valores de densidad para esta serie es de 87 g.

En la figura 43 se representa el contenido en aire en función de la densidad para comprobar la relación que existe entre estos.

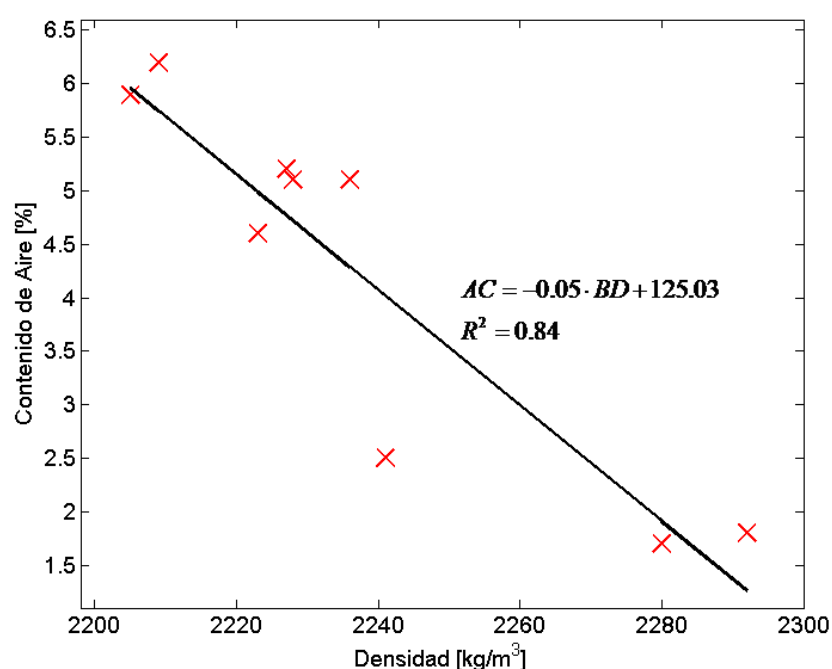


Figura 43. Contenido en aire en función de la densidad de la serie 1.

La tendencia general es que cuando las mezclas de mortero tienen menos aire son más densas. Al hacer un ajuste lineal se obtiene un coeficiente R^2 de 0.82 (a pesar de que el punto de la mezcla 0.804 con 2.5 % y 2241 kg/m³ se encuentra bastante alejado de la recta de ajuste). Este valor de R^2 es considerado alto, mostrando así la relación inversa entre el contenido en aire y la cantidad de CV en las mezclas de mortero de esta serie.

6.3. Resultados de la serie 2

6.3.1. Organización de la serie

Para la serie 2, como se mostró en la tabla 3, las cantidades de todos los componentes son las mismas excepto la cantidad de CV. Además se utiliza 9.90 g (2.20% sobre la masa del cemento) de G27. Las mezclas contienen desde 50 a 250 g de CV en saltos de 25 g, excepto la mezcla 0.837, que tiene una diferencia de 12.5 g respecto a 0.818 y 0.857. Los resultados están representados en función del ratio C/P y de nuevo cuanto mayor sea el ratio C/P menos CV habrá en las mezclas.

6.3.2. Estudio del proceso de fraguado

Resultados de los parámetros de fraguado

C/P	T_{MG}	T_{1500}	T_{20}	T_{2975}
0.643	885	874	1966	1414
0.667	859	851	2053	1442
0.692	818	794	2095	1461
0.720	759	759	2120	1497
0.750	691	728	1792	1387
0.783	643	694	1971	1398
0.818	636	688	1901	1395
0.837	674	709	2050	1476
0.857	701	757	2025	1496
0.900	696	734	2020	1491

Tabla 10. Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 2.

En esta serie las tres últimas mezclas presentaban mucha exudación, lo cual puede explicar que algunos de sus resultados no sean los esperados como pasa en los resultados de T_{MG} y T_{1500} . La mezcla 0.837 fue preparada para comprobar el cambio de tendencia en los resultados del inicio del fraguado mostrado por las mezclas 0.837 y 0.900.

Curvas de velocidad de la onda-p del canal media

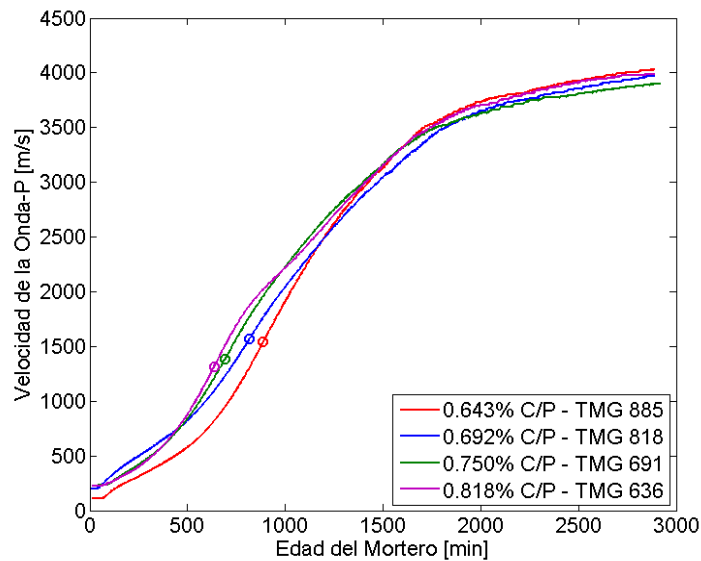


Figura 44. Curvas de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.643, 0.692, 0.750 y 0.818 de la serie 2.

La figura 44 muestra las curvas de velocidad de 4 mezclas diferentes. Como se puede ver las curvas tienen la forma de “S” esperada aunque la zona de crecimiento principal (donde está T_{MG} , aproximadamente desde el minuto 500 hasta el 1700) aumenta suavemente para lo que suelen ser este tipo de curvas. Aunque las curvas son algo confusas se aprecia que cuando hay menos CV en las mezclas, sus curvas se desplazan hacia la izquierda.

Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media

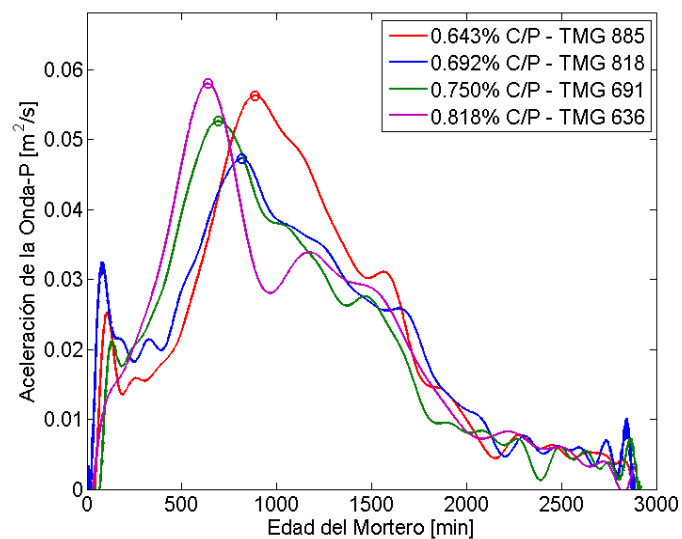


Figura 45. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.643, 0.692, 0.750 y 0.818 de la serie 2.

En la figura 45 se muestran las curvas del gradiente de la velocidad de la onda-p de las mismas mezclas de la figura 44. En las curvas de gradiente de esta serie hay muchos picos y son algo confusas pero se puede detectar fácil e inequívocamente donde se encuentra T_{MG} .

Inicio del fraguado

A continuación, en la tabla 11, se muestran las diferencias entre los parámetros usados para medir el inicio del fraguado, T_{MG} y T_{1500} :

C/P	0.643	0.667	0.692	0.720	0.750	0.783	0.818	0.837	0.857	0.900
$ T_{MG} - T_{1500} $	11	8	24	0	37	51	52	35	56	38
$\frac{ T_{MG} - T_{1500} }{T_{MG}} \%$	1.2	0.9	2.9	0.0	5.6	7.9	8.2	5.2	8.0	5.5

Tabla 11. Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 2.

Se puede apreciar que en general las diferencias no son demasiado importantes, aunque en algunos puntos rondan el 8%. En la figura 46 estos resultados van a ser representados en función de C/P:

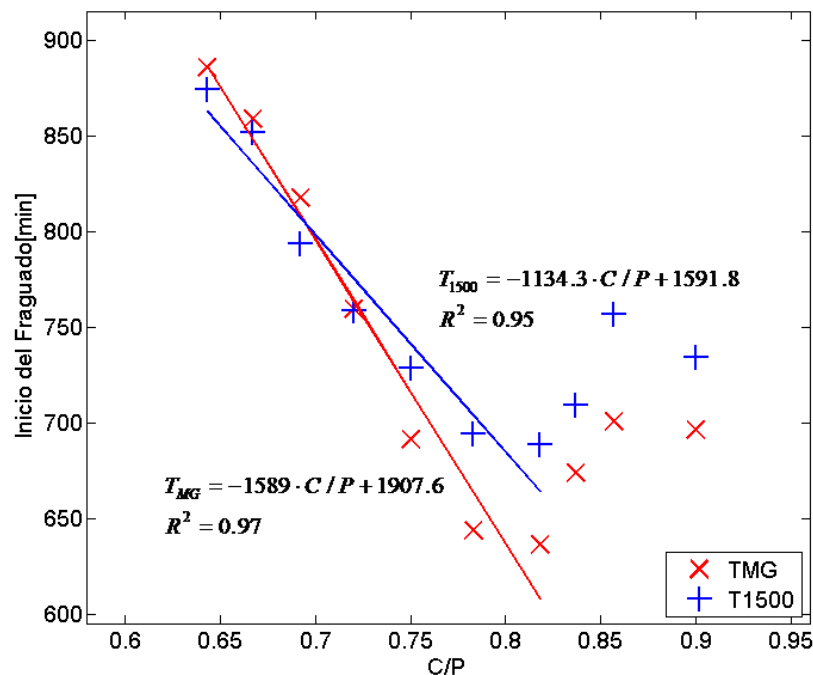


Figura 46. T_{MG} y T_{1500} de la serie 2.

Los resultados muestran que cuanto menos CV hay en las mezclas antes se produce el inicio del proceso de fraguado de acuerdo con los parámetros T_{MG} y T_{1500} , excepto para

las tres últimas mezclas, donde se observó mucha exudación. Sus valores están en contra de la tendencia general, ya que al quitar más CV de las mezclas T_{MG} y T_{1500} tienen valores mayores. Por este motivo no están incluidas en el ajuste realizado, donde una línea recta ha sido aproximada al resto de los resultados, obteniéndose dos coeficientes R^2 muy elevados.

La exudación de 0.837, 0.857 y 0.900 puede explicar que se aumenten los valores de T_{MG} y T_{1500} en contra de la tendencia general, ya que al producirse la exudación el agua sube hacia arriba del mortero recién mezclado arrastrando consigo cemento, por lo que con menos agua y cemento en la parte central del molde del IP8 (que es donde se alojan los transmisores que miden el tiempo de tránsito de las señales emitidas) hay menos productos de hidratación generados y más tiempo es necesario para obtener un camino completo de productos sólidos de hidratación interconectados.

En la figura 47 se representa T_{1500} en función de T_{MG} para ver la relación existente entre estos valores en esta serie:

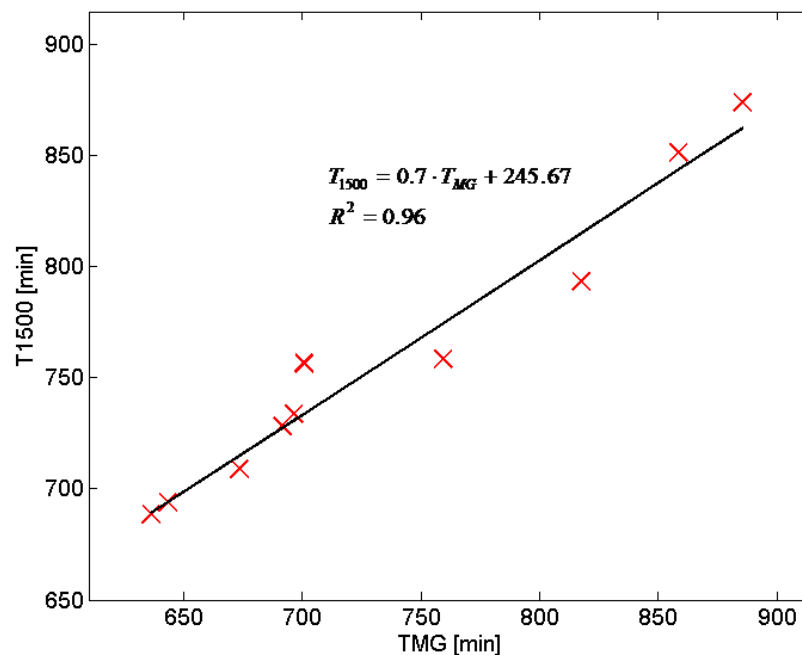


Figura 47. Comparación de T_{MG} y T_{1500} de la serie 2.

La aproximación lineal hecha en la figura 47 tiene un coeficiente R^2 muy alto que muestra la relación que existe entre T_{MG} y T_{1500} , aunque la pendiente en este ajuste es 0.7, lo que indica que las pendientes de las rectas de ajuste de T_{MG} y T_{1500} son bastante diferentes, como se ve en la figura 46.

Final del fraguado

En la tabla 12 se muestran las diferencias entre los valores de T_{20} y T_{2975} para esta serie.

C/P	0.643	0.667	0.692	0.720	0.750	0.783	0.818	0.837	0.857	0.900
$ T_{2975} - T_{20} $	552	611	634	623	405	573	506	579	529	529
$\frac{ T_{2975} - T_{20} }{T_{20}} \%$	28.1	29.8	30.3	29.4	22.6	29.1	26.6	28.0	26.1	26.2

Tabla 12. Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 2.

Los valores de T_{20} son bastante mayores, siendo estos un 27.6% de media mayores que los de T_{2975} . Ambos resultados son representados en la figura 48 en función del ratio C/P para ver si siguen la misma tendencia.

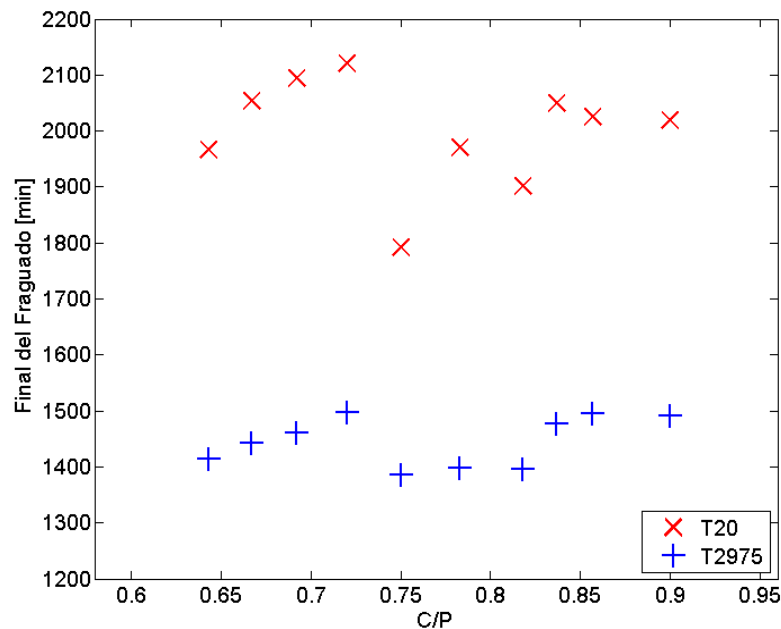


Figura 48. T_{20} y T_{2975} de la serie 2.

Para los dos métodos los resultados son bastante irregulares, especialmente para T_{20} . No se ha realizado ningún ajuste a estos resultados ya que no se observa ninguna tendencia clara, dando la impresión de que los valores permanecen más o menos constantes cuando hay menos CV en las mezclas; aunque los resultados son demasiado irregulares para sacar conclusiones. Esto podría deberse a las irregulares formas de las curvas de los gradientes mostradas en la figura 45.

A pesar de las diferencias entre los valores, en la figura 49 se representa T_{2975} en función de T_{20} , para ver si existe una relación lineal entre ellos.

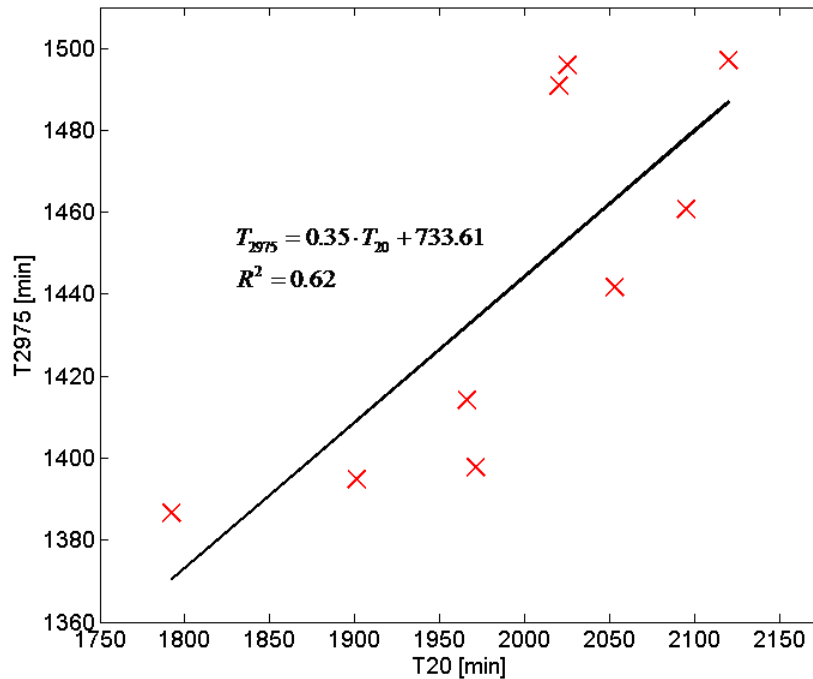


Figura 49. Comparación de T_{20} y T_{2975} de la serie 2.

A pesar de que parece haber una tendencia similar, dado lo irregular de los resultados el coeficiente R^2 obtenido cuando se hace una aproximación lineal es muy bajo.

Los resultados de T_{MG} y T_{1500} muestran que el inicio del fraguado sucede antes cuando el ratio C/P aumenta hasta que empieza a aparecer de forma importante el fenómeno de la exudación. Sin embargo, para el final del fraguado no se ha encontrado una tendencia clara al aumentar el parámetro C/P.

6.3.3. Ensayos frescos

Resultados de los ensayos frescos

C/P	SF	FT	AC	BD
0.643	100	129	5.6	2161
0.667	143	210	5.6	2189
0.692	189	240	5.2	2205
0.720	237	272	3.5	2237
0.750	266	285	3	2271
0.783	259	283	2.3	2262
0.818	268	290	1.6	2285
0.857	259	277	1.8	2307
0.900	269	288	2.1	2272

Tabla 13. Resultados de los ensayos frescos de la serie 2.

Ensayos de consistencia

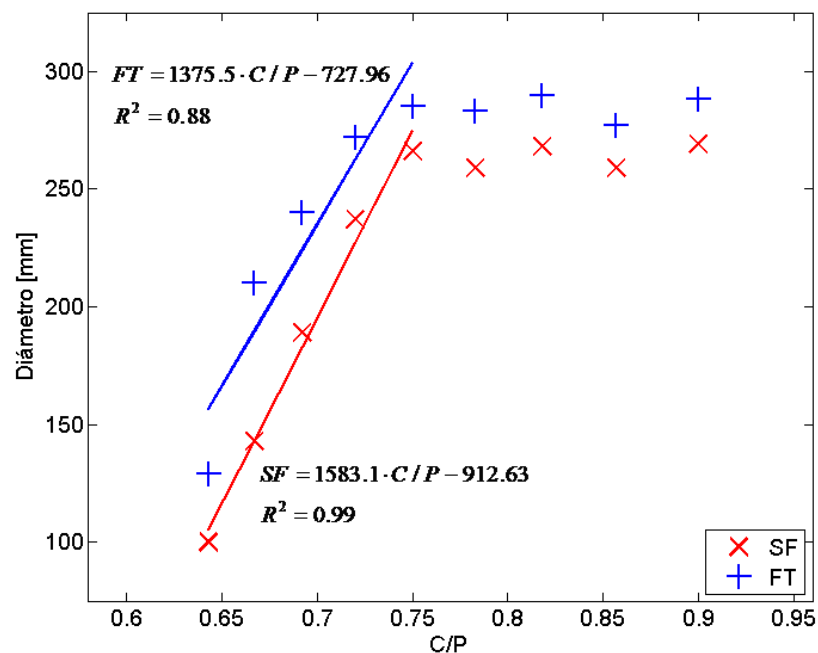


Figura 50. Ensayos de consistencia de la serie 2.

Como se aprecia en la figura 50, ambos resultados muestran el mismo comportamiento: con menos CV las mezclas son más líquidas. Dos diferentes regiones se pueden observar, en la primera parte hay un crecimiento aproximadamente lineal hasta la mezcla 0.750, en donde los coeficientes R^2 del ajuste realizado son muy altos. Después de la mezcla 0.750 se alcanza un punto de saturación y la fluidez de las mezclas

permanecen aproximadamente constantes a pesar de que se siga aumentando el ratio C/P.

Por lo tanto para esta serie el ratio C/P tiene influencia desde aproximadamente 0.650 (0.643 tiene el mínimo valor posible de SF, 100 mm) hasta 0.750, mezcla a partir de la cual la fluidez apenas varia.

Para tratar de ver la relación entre la fluidez de las mezclas y el tiempo en el que se inicia el fraguado, según el tiempo en el que se produce el máximo gradiente, en la figura 51 se representa T_{MG} en función de los resultados de SF y FT.

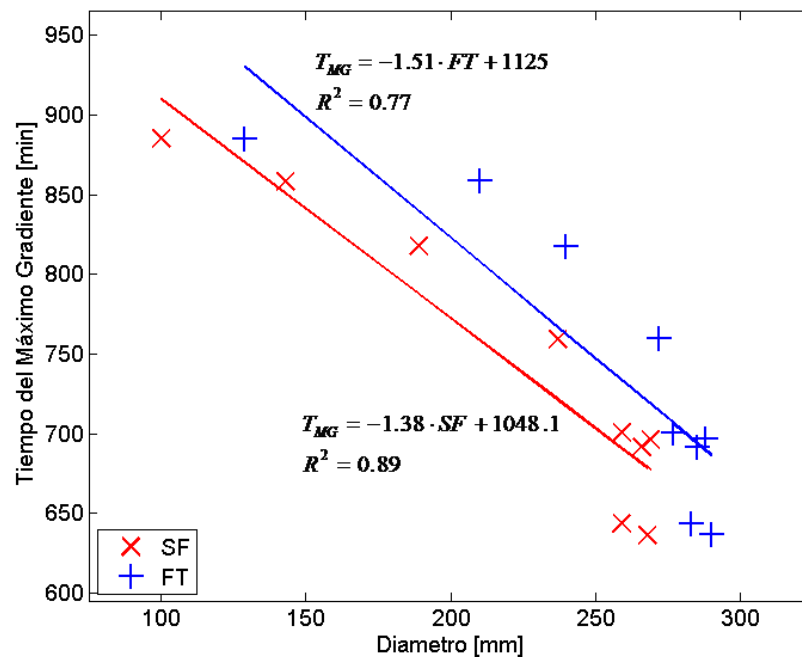


Figura 51. T_{MG} en función de SF y FT de la serie 2.

Cuanto más líquidas son las mezclas antes se produce el inicio del fraguado según los resultados de T_{MG} como era esperado. Por lo tanto la relación entre la fluidez y el inicio del fraguado es una relación inversa.

Sendos ajustes lineales se han hecho para SF y FT con dos coeficientes R^2 elevados, especialmente para la relación entre T_{MG} y los resultados de SF.

Ensayos de contenido en aire y densidad

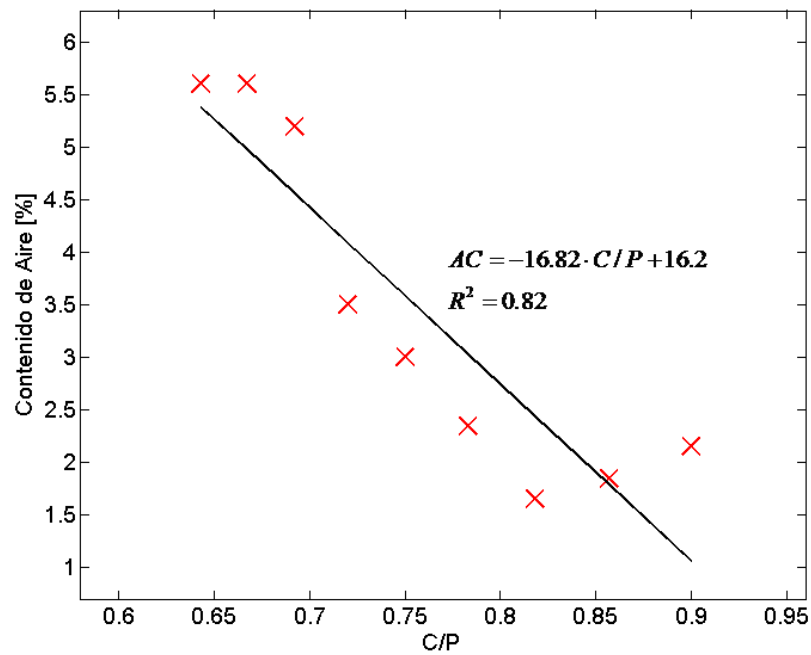


Figura 52. Contenido en aire de la serie 2.

Como se ve en la figura 52, el contenido en aire de las mezclas baja cuando estas tienen menos CV. Una línea recta ha sido aproximada a los resultados del ensayo “air content” con un coeficiente R^2 elevado.

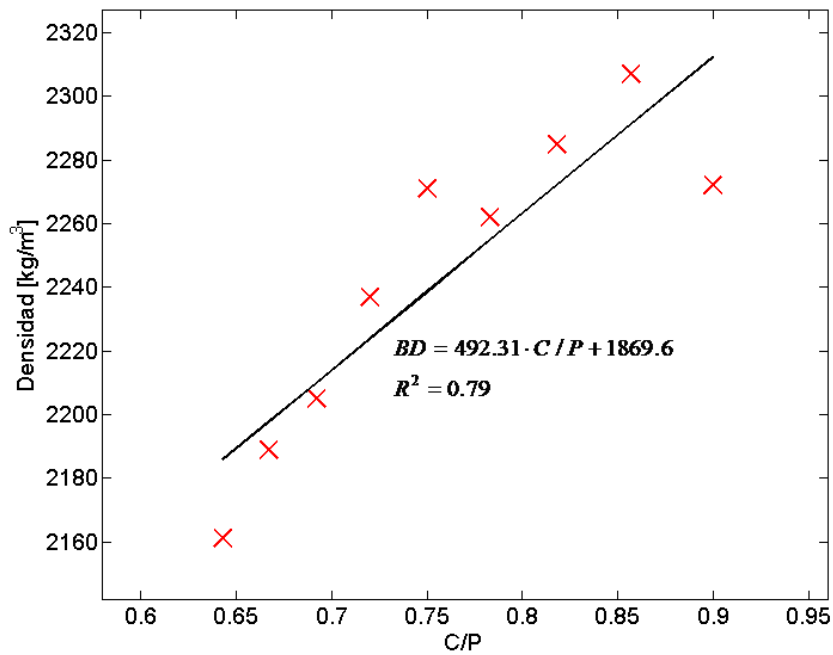


Figura 53. Densidad de la serie 2.

Los resultados de los ensayos “bulk density” para esta serie muestran algunas irregularidades, aunque tiene un aceptable coeficiente R^2 cuando se aproxima una línea recta a los resultados. La tendencia general es que las mezclas son más densas cuanto menos CV es añadido. Para esta serie se usó el primer procedimiento para medir la densidad.

En la figura 54 se representa el contenido en aire en función de la densidad para comprobar la relación que existe entre estos.

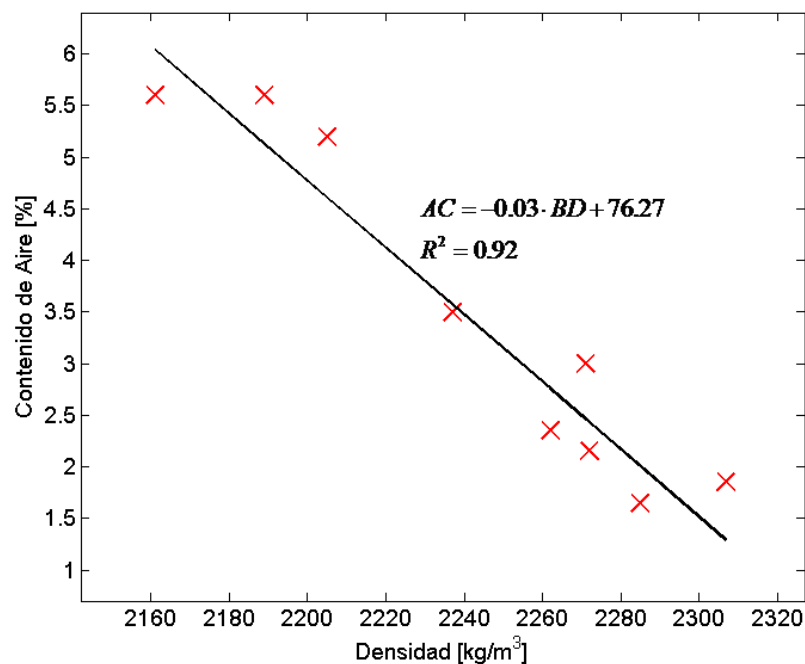


Figura 54. Contenido en aire en función de la densidad de la serie 2.

La tendencia general es que cuando las mezclas de mortero tienen menos aire son más densas. Al hacer un ajuste lineal se obtiene un coeficiente R^2 bastante elevado, 0.92, mostrando la relación inversa entre el contenido en aire y la densidad en las mezclas de mortero de esta serie.

6.4. Resultados de la serie 3

6.4.1. Organización de la serie

En la serie 3, como se mostró en la tabla 3, las cantidades de todos los componentes de las mezclas son las mismas excepto la cantidad de SP G51. Las mezclas contienen desde 0.40% hasta 1.10% de SP G51 respecto a la masa del cemento en saltos de 0.10%, excepto las mezclas 0.55% y 0.65%.

6.4.2. Estudio del proceso de fraguado

Resultados de los parámetros de fraguado

% SP G51	T_{MG}	T_{1500}	T_{20}	T_{2975}
0.40	541	577	1520	1108
0.50	545	571	1437	1069
0.55	562	578	1525	1064
0.60	579	607	1500	1143
0.65	590	598	1545	1063
0.70	583	593	1524	1132
0.80	584	611	1577	1189
0.90	591	605	1633	1145
1.00	665	668	1616	1171
1.10	770	774	1760	1282

Tabla 14. Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 3.

En esta serie las dos últimas mezclas presentaban mucha exudación por lo que no se continuó preparando más mezclas aumentando la cantidad de SP G51. Las mezclas 0.55% y 0.65% se hicieron con una diferencia de 0.05% respecto a la de sus extremos, por que entre las mezclas 0.70%, 0.60% y 0.50% hubo una gran diferencia en cuanto a su fluidez, como muestran los resultados de los ensayos de consistencia que serán representados más adelante.

Curvas de velocidad de la onda-p del canal media

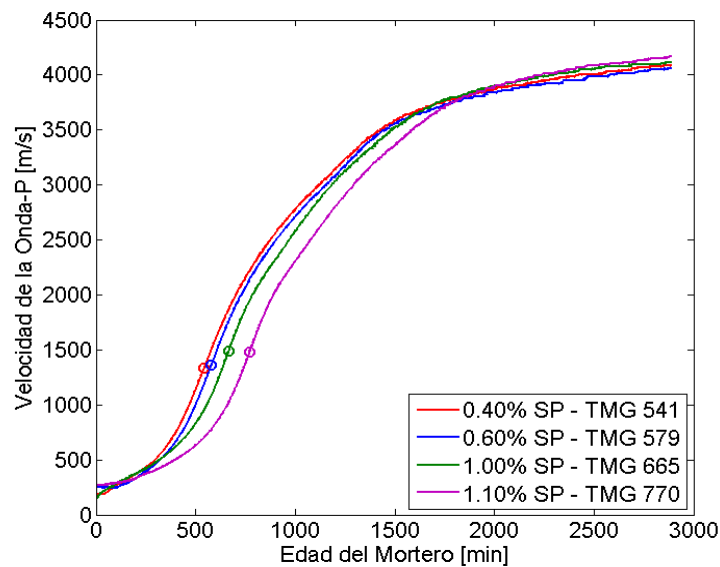


Figura 55. Curvas de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.40%, 0.60%, 1.00% y 1.10% de la serie 3.

En esta serie todas las curvas se encuentran en un lugar parecido excepto las dos últimas mezclas, aunque en general se desplazan a la derecha cuando se añade SP. Estas dos últimas mezclas mostraron mucha exudación y sus curvas se encuentran claramente más a la derecha que el resto, especialmente la mezcla 1.10%. Como se puede ver en la figura 55, las curvas tienen la forma de “S” esperada y son similares entre ellas.

Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media:

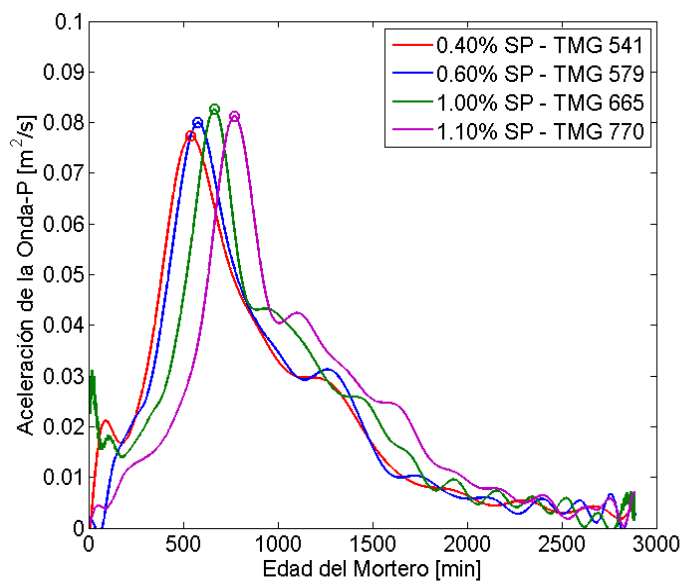


Figura 56. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.40%, 0.60%, 1.00% y 1.10% de la serie 3.

En la figura 56 se muestran las curvas del gradiente de velocidad de las mismas mezclas que en la figura 55. Los gradientes tienen formas similares y de nuevo se desplazan hacia la derecha cuando se añade SP.

Inicio del fraguado

Las diferencias entre los valores de los parámetros usados para medir el inicio del fraguado, T_{MG} y T_{1500} , se muestran en la tabla 15.

% SP G51	0.40	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10
$ T_{MG} - T_{1500} $	36	26	16	28	8	10	27	14	3	4
$\frac{ T_{MG} - T_{1500} }{T_{MG}} \%$	6.7	4.8	2.8	4.8	1.4	1.7	4.6	2.4	0.5	0.5

Tabla 15. Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 3.

Como es posible ver, las diferencias entre ambos resultados no son en general demasiado grandes, ya que son inferiores al 5% para todos los puntos excepto para la mezcla 0.40%.

En esta serie los dos últimos valores son mucho mayores que los demás, por eso es posible aproximar una función exponencial a los resultados como se muestra a continuación.

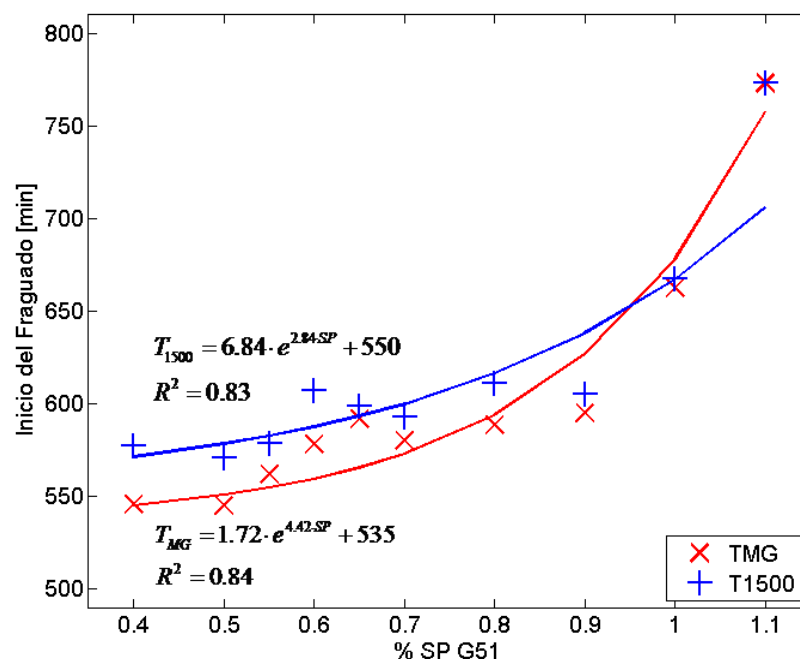


Figura 57. T_{MG} y T_{1500} con ajuste exponencial de la serie 3.

En la figura 57 se muestra el efecto retardador que tiene el SP G51. Una función exponencial ha sido aproximada a los resultados ya que los dos últimos puntos presentan valores mucho más elevados que el resto, por lo que se puede decir que hay un crecimiento suave del inicio del fraguado acorde a los parámetros T_{MG} y T_{1500} hasta la mezcla 0.90%, a partir de la cual los valores empiezan a crecer rápidamente.

La exudación presentada por las mezclas 1.00% y 1.10% puede provocar estas grandes diferencias, ya que como se explico en el análisis de la figura 46 de la serie 2, la exudación provoca una ascensión del agua que arrastra cemento, lo que puede provocar un retraso en el inicio de fraguado.

Pero debido a este proceso de exudación se ha hecho otro análisis para estos resultados. En este nuevo análisis se aproximan dos líneas rectas, una primera para los puntos donde T_{MG} y T_{1500} crecen suavemente (desde 0.40% hasta 0.90%) y otra línea para el resto de las mezclas. Este ajuste se representa en la figura 58.

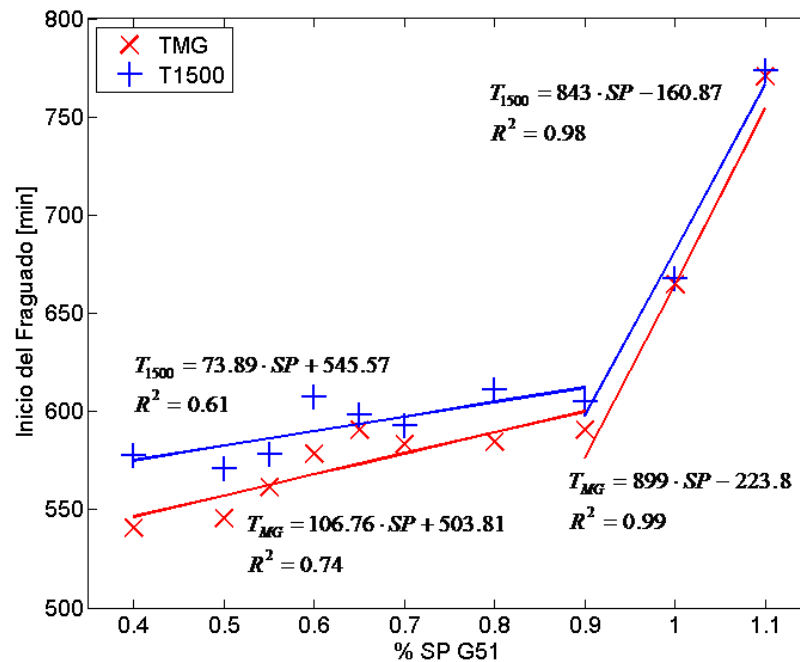


Figura 58. T_{MG} y T_{1500} con ajuste bilineal de la serie 3.

En la primera parte del ajuste ambos métodos muestran unos resultados algo irregulares por lo que los coeficientes R^2 son algo bajos. Esto podría ser porque las diferencias entre los valores son bastante bajas, y quizá la precisión de estos métodos no es suficiente en este caso, ya que son pruebas que duran dos días y los resultados tiene que ser aproximados a polinomios de alto orden. En cualquier caso si que se puede observar que la tendencia general es la de aumentar el tiempo del inicio del fraguado cuando más SP es añadido a las mezclas.

En la segunda parte el ajuste es muy preciso como se ve en el alto valor de los coeficientes R^2 , pero también es verdad que solo tres puntos están sometidos a esta aproximación.

A continuación, en la figura 59, se representa T_{1500} en función de T_{MG} para comprobar la relación existente entre ellos.

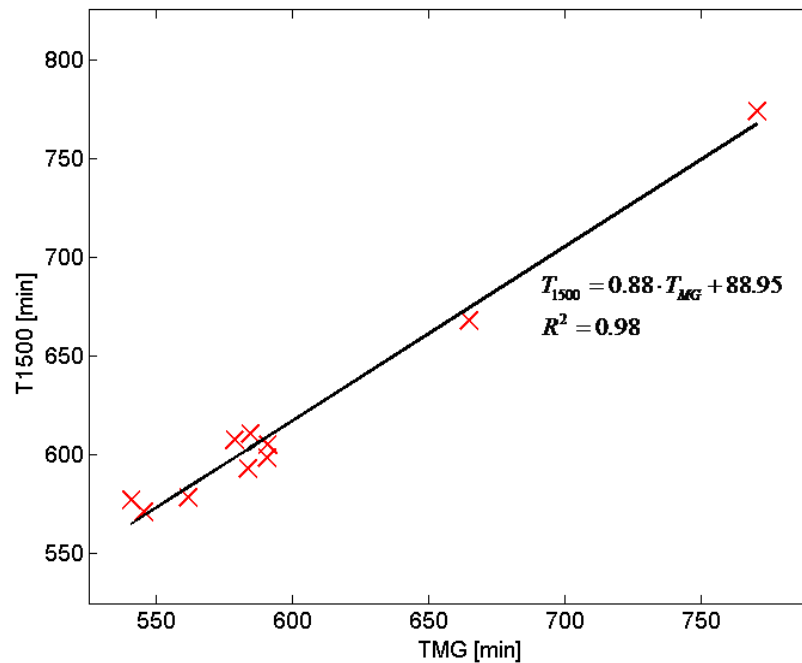


Figura 59. Comparación de T_{MG} y T_{1500} de la serie 3.

La aproximación lineal hecha en la figura 59 tiene un coeficiente R^2 muy alto, mostrando la relación que existe entre los valores de T_{MG} y T_{1500} para esta serie.

Final del fraguado

Los resultados de T_{20} y T_{2975} usados para estudiar el final del fraguado son mostrados a continuación.

% SP G51	0.40	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10
$ T_{2975} - T_{20} $	412	368	461	357	482	392	388	488	445	478
$\frac{ T_{2975} - T_{20} }{T_{20}} \%$	27.1	25.6	30.2	23.8	31.2	25.7	24.6	29.9	27.5	27.1

Tabla 16. Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 3.

Las diferencias entre ambos resultados son grandes, de hecho los valores de T_{20} son un 27.3% de media mayores que los de T_{2975} . A continuación, se representan ambos resultados en función del % de SP para ver si siguen la misma tendencia.

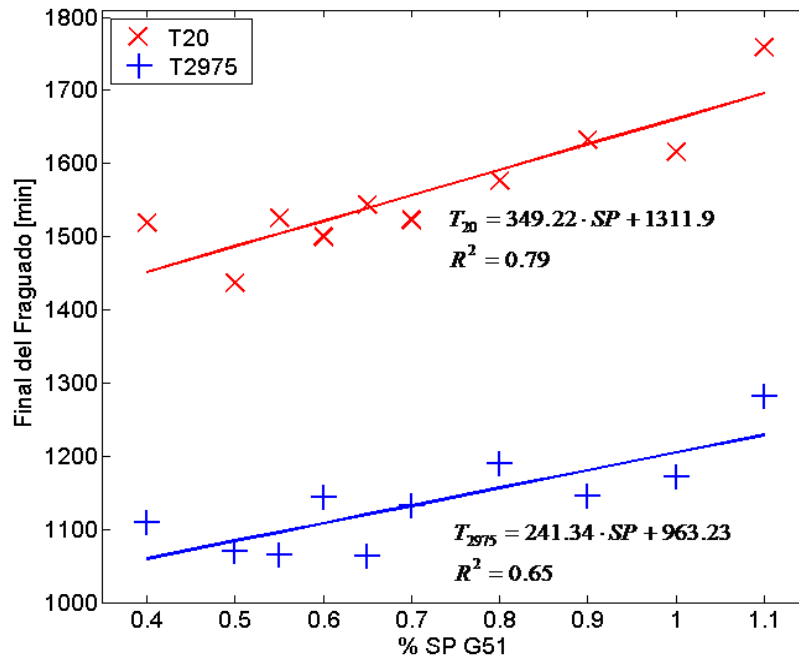


Figura 60. T_{20} y T_{2975} de la serie 3.

La figura 60 muestra que cuando se añade SP a la mezcla, el final del fraguado se retrasa de acuerdo a los parámetros T_{20} y T_{2975} . A diferencia con el inicio del fraguado, en este caso se ha hecho un ajuste lineal y no bilineal ya que las dos últimas mezclas no tienen un valor mucho más elevado que el resto.

A pesar de las diferencias entre los valores, en la figura 61 se representa T_{2975} en función de T_{20} para ver si existe una relación lineal entre ellos.

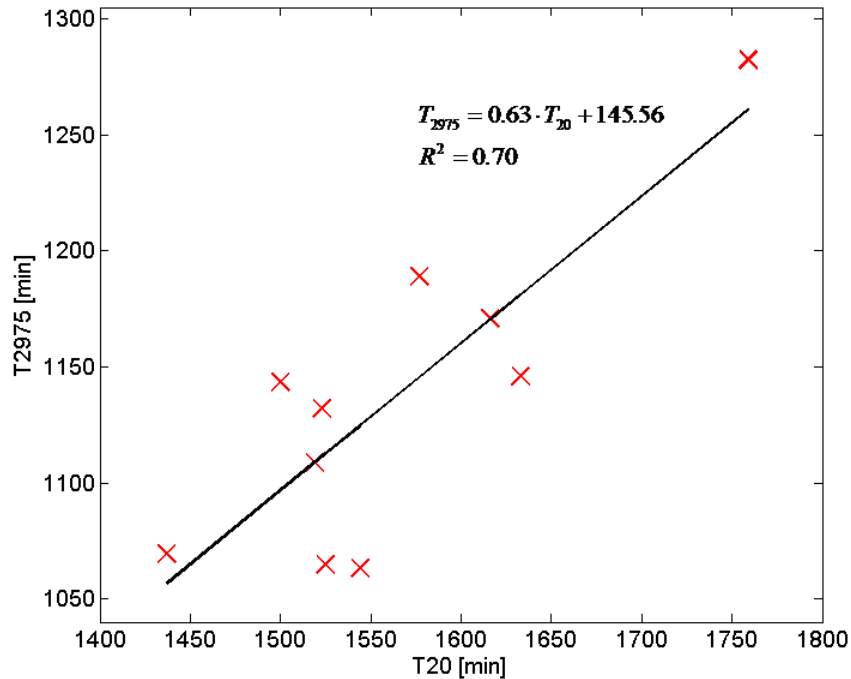


Figura 61. Comparación de T_{20} y T_{2975} de la serie 3.

Aunque parece haber una tendencia similar, el coeficiente R^2 obtenido cuando se hace una aproximación lineal es bajo.

Por lo tanto, se ha visto un retraso del proceso de fraguado cuando SP se añade a las mezclas de mortero; aunque la exudación presente en las dos últimas mezclas afecta de forma diferente al inicio que al final del fraguado, lo que hace que se hagan distintos análisis para los resultados de T_{MG} y T_{1500} y los resultados de T_{20} y T_{2975} .

6.4.3. Ensayos frescos

Resultados de los ensayos frescos

% SP G51	SF	FT	AC	BD
0.40	100	129	6.0	2197
0.50	100	143	5.4	2189
0.55	100	153	5.8	2222
0.60	192	226	5.3	2236
0.65	260	279	4.9	2223
0.70	280	300	5.0	2259
0.80	292	300	3.5	2252
0.90	291	300	2.0	2243
1.00	294	300	1.7	2272
1.10	300	300	1.1	2288

Tabla 17. Resultados de los ensayos frescos de la serie 3.

Ensayos de consistencia

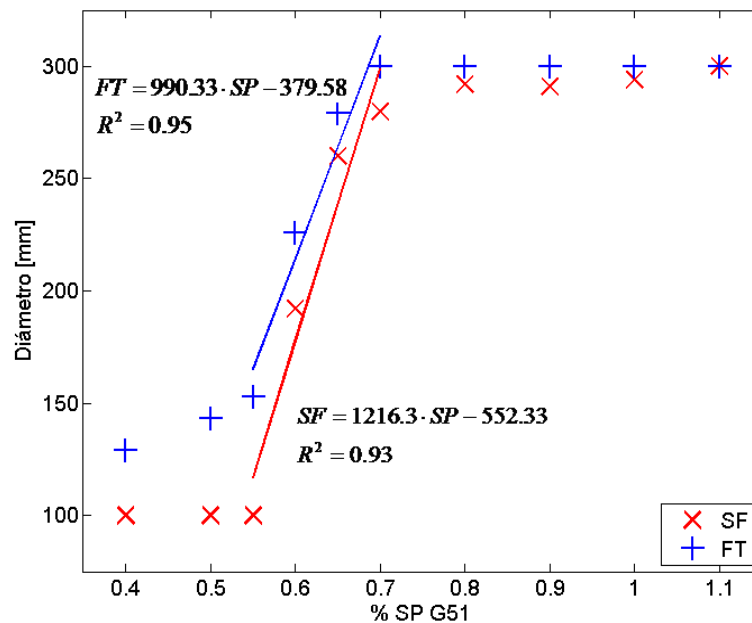


Figura 62. Ensayos de consistencia de la serie 3.

En la figura 62 se muestra que, para los resultados de los dos métodos de medir la consistencia se ven tres partes diferenciadas. Para las tres primeras mezclas (0.40%, 0.50% y 0.55%) la cantidad de SP no es suficiente para tener influencia en los resultados, siendo el valor de los resultados de SF el mínimo posible, 100 mm.

Entre los puntos 0.55% y 0.70% las mezclas empiezan a comportarse como mortero autocompactante, ya que son capaces de fluir por si solas como se ve en los resultados de SF. Los diámetros crecen muy rápidamente cuando se añade más SP lo que muestra el fuerte efecto que tiene el SP G51. Para ambos resultados se hacen sendos ajustes lineales obteniéndose elevados coeficientes R^2 .

Alrededor de la mezcla 0.70% se alcanza una saturación y la fluidez de las mezclas permanece aproximadamente constante a pesar de que se añada más SP. En esta parte todos los valores de FT son el máximo posible, 300 mm. Quizá si la mesa donde se realizan las pruebas de consistencia hubiese sido más grande se habrían podido medir diámetros mayores, aunque no se espera que estos diámetros fuesen mucho mayores ya que como se ha dicho a partir de 0.70% la fluidez de las mezclas permanece aproximadamente constante.

Por lo tanto en este caso la zona de influencia del SP G51 en cuanto a la fluidez de las mezclas es desde 0.55% hasta 0.70%, la cual puede ser considerada bastante pequeña.

Para tratar de ver la relación entre la fluidez de las mezclas y el tiempo en el que se inicia el fraguado, según el tiempo en el que se produce el máximo gradiente, en la figura 63 se representa T_{MG} en función de los resultados de SF y FT.

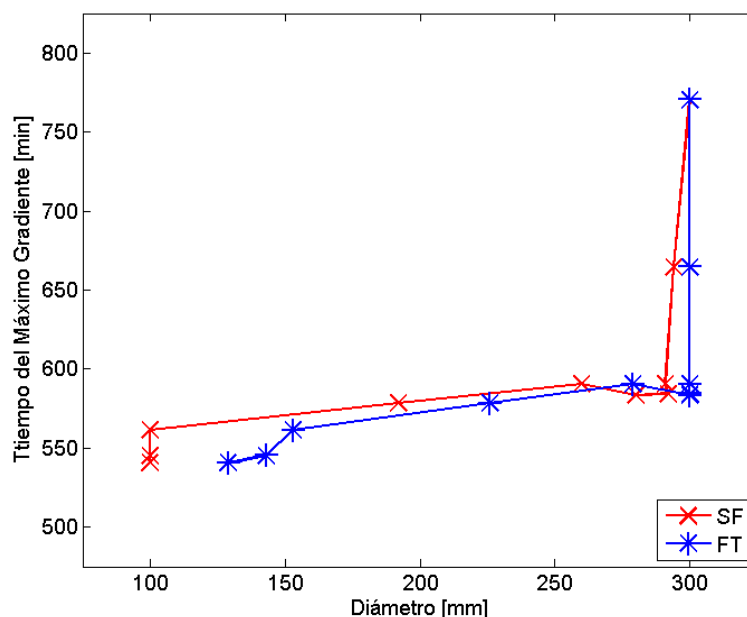


Figura 63. T_{MG} en función de SF y FT de la serie 3.

Se puede apreciar que cuanto más fluidas son las mezclas mayores son los valores de T_{MG} . En este caso no se ha hecho ningún ajuste ya que las mezclas alcanzan muy rápidamente el valor máximo de diámetro pero T_{MG} sigue creciendo fuertemente.

Ensayos de contenido en aire y densidad

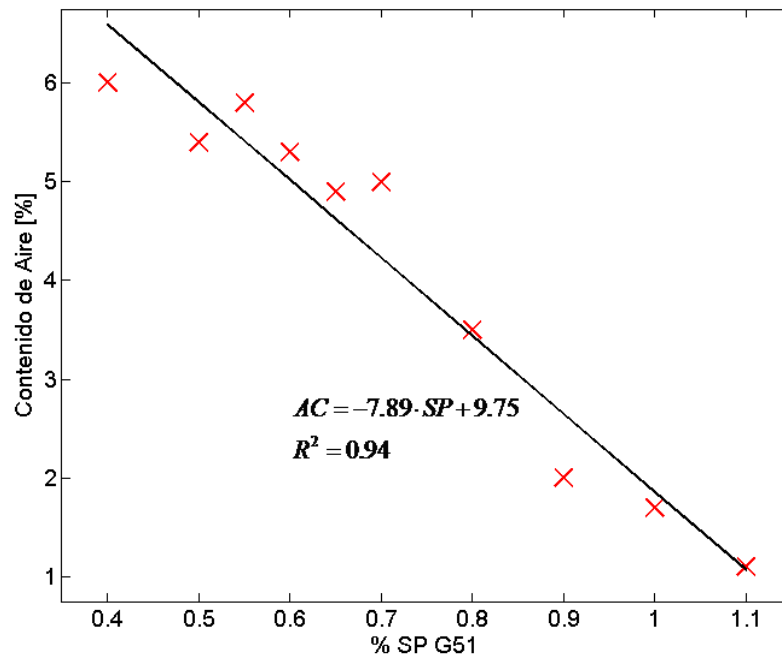


Figura 64. Contenido en aire de la serie 3.

Como se muestra en la figura 64 el contenido en aire de las mezclas baja cuando más SP es añadido. Se ha aproximado una línea recta a los resultados obteniéndose un coeficiente R^2 muy elevado.

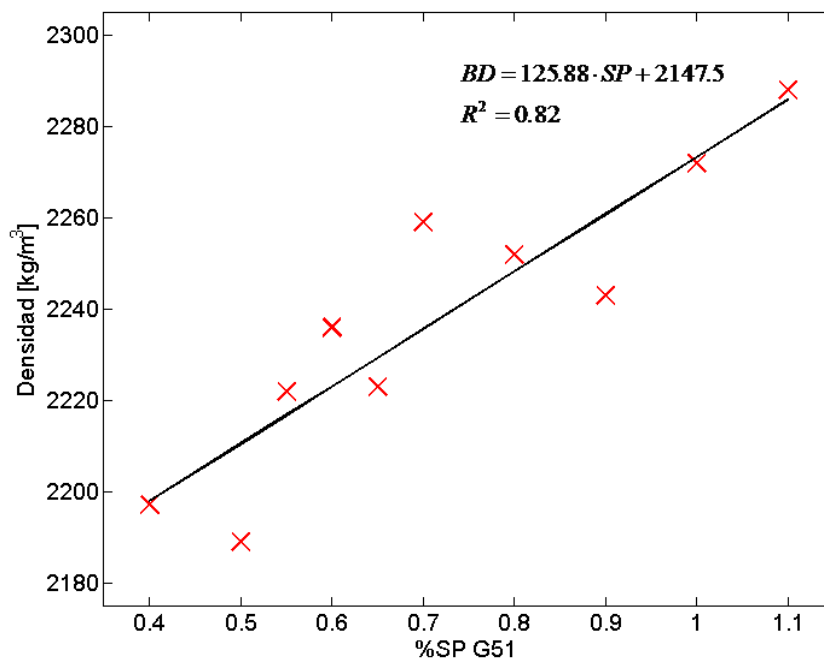


Figura 65. Densidad de la serie 3.

La tendencia general de los resultados del ensayo de densidad de esta serie es que las mezclas son más densas cuando SP es añadido, como muestra la figura 65, ya que como se ve en la figura 64 estas van teniendo menos aire. Hay algunos picos y puntos que se salen de la tendencia general pero esto puede ser explicado por que las diferencias entre las densidades de esta serie son pequeñas (100 g es la diferencia entre la más y la menos densa) y el método usado para medir la densidad, en este caso el segundo procedimiento, no es suficientemente preciso para esas diferencias. De todas formas se ha realizado un ajuste lineal y se ha obtenido un coeficiente R^2 bastante elevado.

A continuación, en la figura 66, se representa el contenido en aire en función de la densidad para comprobar la relación que existe entre estos.

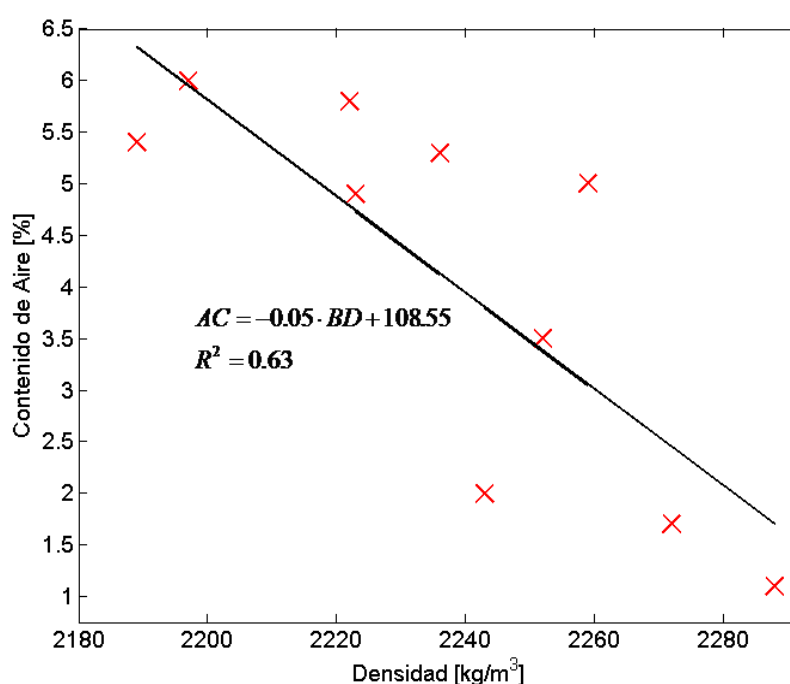


Figura 66. Contenido en aire en función de la densidad de la serie 3.

La tendencia general es que cuando las mezclas de mortero tienen menos aire son más densas, es decir, que existe una relación inversa entre ambas medidas. Al hacer un ajuste lineal se obtiene un coeficiente R^2 bastante pequeño, lo cual podría ser debido a las imprecisiones en las medidas, especialmente en los ensayos de densidad, aunque también podría ser que la relación entre ambas medidas no tenga una dependencia lineal para esta serie, aunque la aproximación lineal para esta misma relación se ajusta con un alto R^2 para las series 1 y 2 como se ve en las figuras 43 y 54.

6.5. Resultados de la serie 4

6.5.1. Organización de la serie

En la serie 4 las cantidades de todos los componentes de las mezclas son las mismas excepto la cantidad de SP G27, como se mostró en la tabla 3. Las mezclas contienen desde 0.80% hasta 2.20% de SP G27 respecto a la masa del cemento en saltos de 0.20%.

Los ensayos de ultrasonidos fueron hechos dos veces en esta serie. La diferencia entre ellos es que las pruebas correspondiente a los resultados de la serie 4-1 fueron hechos con unas CV sometidas a 4 meses más de exposición ambiental que las CV de la serie 4-2.

6.5.2. Estudio del proceso de fraguado

Resultados de los parámetros de fraguado

Resultados de la serie 4-1:

% SP G27	T_{MG-1}	T_{1500-1}	T_{20-1}	T_{2975-1}
0.80	733	762	1722	1359
1.00	775	802	1850	1444
1.20	834	846	1970	1506
1.40	828	841	1903	1509
1.60	841	864	1980	1596
1.80	876	922	2161	1737
2.00	840	893	2141	1665
2.20	810	849	2308	1658

Tabla 18. Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 4-1.

Resultados de la serie 4-2:

% SP G27	T_{MG-2}	T_{1500-2}	T_{20-2}	T_{2975-2}
0.80	568	600	1301	1068
1.00	618	628	1337	1060
1.20	649	630	1405	1094
1.40	652	650	1478	1162
1.60	626	624	1424	1131
1.80	597	621	1468	1208
2.00	639	636	1520	1266
2.20	682	675	1679	1291

Tabla 19. Resultados de los parámetros de fraguado de la serie 4-2.

Curvas de velocidad de la onda-p del canal media

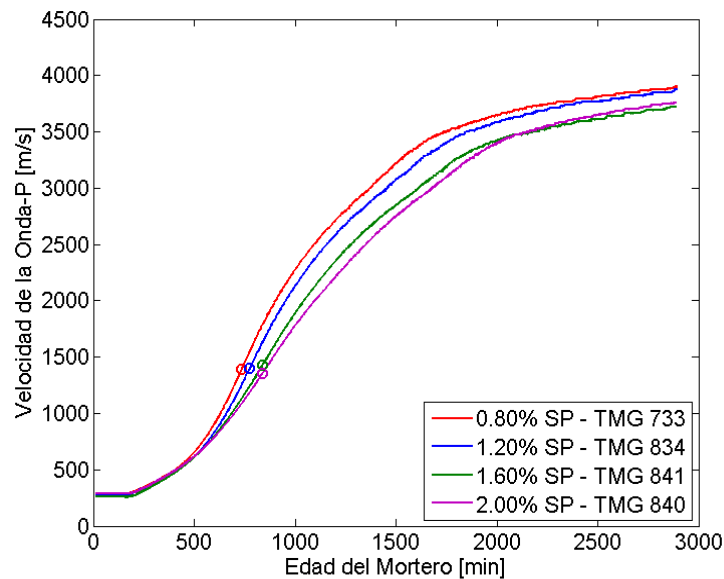


Figura 67. Curvas de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.80%, 1.20%, 1.60% y 2.00% de la serie 4-1.

La figura 67 muestra las curvas de velocidad de la onda-p del canal media de 4 mezclas diferentes. Como es posible ver cuanto más SP hay en las mezclas las curvas se desplazan hacia la derecha. Las curvas tienen la forma de “S” típica en estos casos aunque la zona de crecimiento principal (desde 300 hasta 1700 min aproximadamente, donde se encuentra T_{MG}) aumenta suavemente en esta serie.

Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media

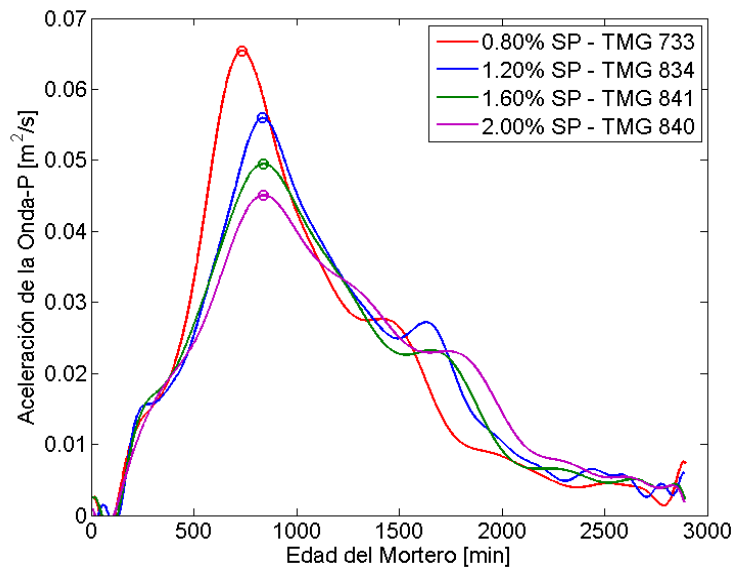


Figura 68. Curvas del gradiente de velocidad de la onda-p del canal media para las mezclas 0.80%, 1.20%, 1.60% y 2.00% de la serie 4-1.

En la figura 68 se muestran las curvas del gradiente de la velocidad de la onda-p de las mismas mezclas de la figura 67. Los gradientes tienen formas similares y de nuevo se desplazan hacia la derecha cuando SP es añadido, apreciándose claramente donde está el valor T_{MG} .

Inicio del fraguado

Lo primero de todo que se va a hacer es comparar los valores calculados de los dos ensayos de ultrasonidos realizados.

% SP G27	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
$ T_{MG-1} - T_{MG-2} $	165	157	185	176	215	279	201	128
$\frac{ T_{MG-1} - T_{MG-2} }{T_{MG-1}} \%$	22.5	20.3	22.2	21.3	25.6	31.8	23.9	15.8
$ T_{1500-1} - T_{1500-2} $	162	174	216	191	240	301	257	174
$\frac{ T_{1500-1} - T_{1500-2} }{T_{1500-1}} \%$	21.3	21.7	25.6	22.7	27.8	32.6	28.8	20.5

Tabla 20. Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 4-1 y 4-2.

La diferencia entre ambos resultados es muy alta, como muestra la tabla 20. Los resultados de la serie 4-1 son un 24% de media mayores que los de la serie 4-2, pero como fue dicho sus las CV tuvieron 4 meses más de exposición atmosférica lo cual afecta a los resultados. A continuación, en la tabla 21, se hace una comparación entre los resultados de T_{MG} y T_{1500} para ambas series.

% SP G27	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
$ T_{MG-1} - T_{1500-1} $	29	27	12	13	23	46	53	39
$\frac{ T_{MG-1} - T_{1500-1} }{T_{MG-1}} \%$	4.0	3.5	1.4	1.6	2.7	5.3	6.3	4.8
$ T_{MG-2} - T_{1500-2} $	32	10	19	2	2	24	3	7
$\frac{ T_{MG-2} - T_{1500-2} }{T_{MG-2}} \%$	5.6	1.6	2.9	0.3	0.3	4.0	0.5	1.0

Tabla 21. Diferencias entre T_{MG} y T_{1500} de la serie 4.

Las diferencias entre los valores de ambos métodos no son grandes para ninguna de las dos series, de hecho, en la mayoría de las mezclas está por debajo del 5%. En la figura 69 se representan en función del % de SP para ver que tendencia tienen los resultados.

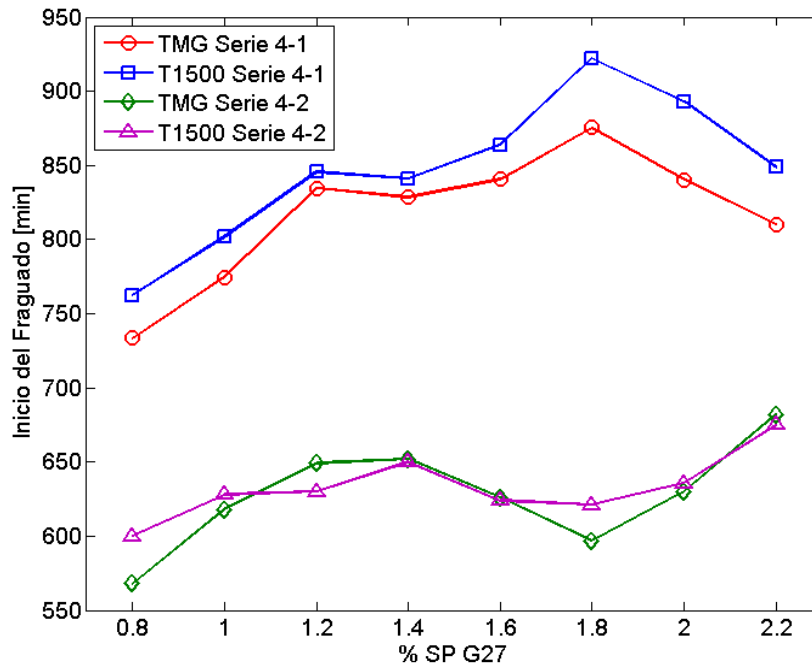


Figura 69. T_{MG} y T_{1500} de la serie 4-1 y 4-2.

Los resultados de ambas series tienen una forma bastante compleja. Para el resultado de la serie 4-1 se aprecia un aumento de los valores cuando se añade SP hasta la mezcla 1.80%, (a excepción de la mezcla 1.20% que es un poco más elevada que 1.40%) y después de esta mezcla los valores vuelven a descender. Sin embargo los resultados de serie 4-2 muestran un primer incremento de los valores hasta la mezcla 1.40% (aunque la mezcla 1.20% tiene prácticamente el mismo valor que 1.40%), a partir de ahí los valores vuelven a descender hasta 1.80%, valor a partir del cual vuelven a ascender.

Esta tendencia cambiante no es la que se esperaba obtener por lo que el análisis más probable es que a partir de aproximadamente la mezcla 1.20% se alcance un punto de saturación y el valor de T_{MG} ya no este influenciado por la cantidad de SP. Los picos que aparecen a partir de este punto podrían deberse a algún problema sucedido en el laboratorio, o a la falta de precisión en el algoritmo usado para calcular T_{MG} , etc.

Para comprobar esto se va a mostrar lo que distan el valor de estos puntos con el de la media de todas estas mezclas (desde la mezcla 1.20% hasta la 2.20%), para los resultados de T_{MG-1} , ya que estos parecen ser algo más regulares.

$$T_{MEDIA} = \frac{T_{1.20} + T_{1.40} + T_{1.60} + T_{1.80} + T_{2.00} + T_{2.20}}{6} = 838.2 \text{ min}$$

% SP G27	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
$ T_{MG1} - T_{MEDIA} $	4.2	10.2	2.8	37.8	1.8	28.2
$\frac{ T_{MG1} - T_{MEDIA} }{T_{MEDIA}} \%$	0.5	1.2	0.3	4.5	0.2	3.4

Tabla 22. Diferencias entre los valores de T_{MG1} y su media para la mezclas con desde 1.20% hasta 2.20% de la serie 4.

Como es mostrado en la tabla 22 las diferencias son pequeñas, quitando quizá el punto 1.80% donde llegan al 4.5%. Debido a esto, se podría decir que hasta una mezcla con aproximadamente 1.20% se aprecia el efecto retardador del SP en cuanto al inicio del fraguado, pero a partir de esta mezcla los valores de T_{MG} permanecen aproximadamente constantes.

Para ambos métodos la diferencia entre resultados de T_{MG} y de T_{1500} son pequeñas como mostraba la tabla 20. A continuación, en la figura 70, se representa T_{1500} en función de T_{MG} para comprobar la relación existente entre ellos.

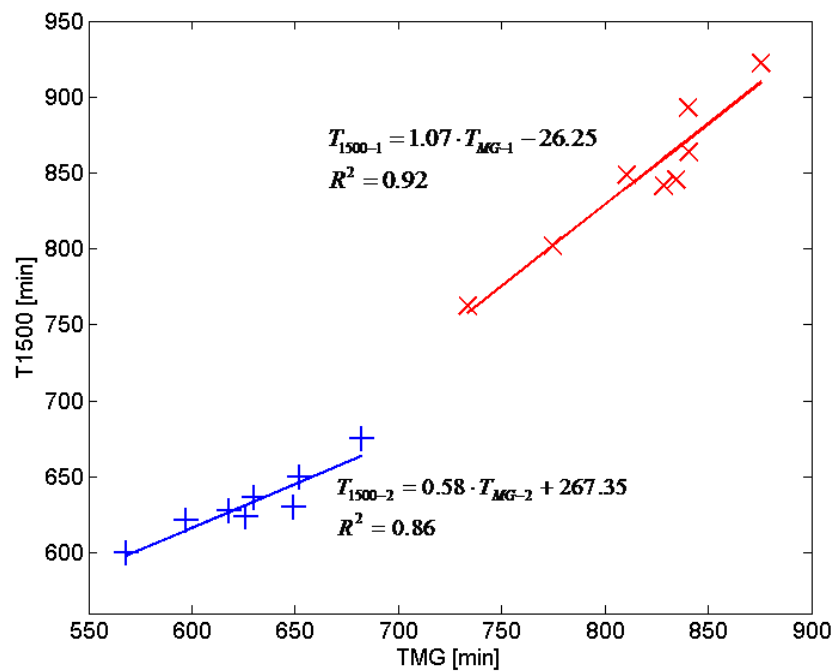


Figura 70. Comparación de T_{MG} y T_{1500} de la serie 4-1 y 4-2.

La aproximación lineal hecha en la figura 70 para ambos métodos tiene un coeficiente R^2 muy alto, mostrando la relación que existe entre T_{MG} y T_{1500} .

Final del fraguado

En la tabla 23 se muestran las diferencias entre los valores de T_{20} y T_{2975} de las dos series realizadas.

% SP G27	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
$ T_{20-1} - T_{20-2} $	421	513	565	425	556	693	621	629
$\frac{ T_{20-1} - T_{20-2} }{T_{20-1}} \%$	24.4	27.7	28.7	22.3	28.1	32.1	29.0	27.3
$ T_{2975-1} - T_{2975-2} $	291	384	412	347	465	529	399	367
$\frac{ T_{2975-1} - T_{2975-2} }{T_{2975-2}} \%$	21.4	26.6	27.4	23.0	29.1	30.5	24.0	22.1

Tabla 23. Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 4-1 y 4-2.

La diferencia entre ambos resultados es muy alta, siendo los resultados de la serie 4-1 un 26.5% de media mayores que los de la serie 4-2. A continuación se hace una comparación entre los resultados de T_{MG} y T_{2975} para ambas series.

% SP G27	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
$ T_{2975-1} - T_{20-1} $	363	406	464	394	384	424	476	650
$\frac{ T_{2975-1} - T_{20-1} }{T_{20-1}} \%$	21.1	21.9	23.6	20.7	19.4	19.6	22.2	28.2
$ T_{2975-2} - T_{20-2} $	233	277	311	316	293	260	254	388
$\frac{ T_{2975-2} - T_{20-2} }{T_{20-2}} \%$	17.9	20.7	22.1	21.3	20.6	17.7	16.7	23.1

Tabla 24. Diferencias entre T_{20} y T_{2975} de la serie 4.

Las diferencias entre los resultados de ambos métodos son grandes, siendo los valores de T_{20} un 21% de media mayores que los de T_{2975} , de todas formas ambos resultados son representados en función del % de SP para ver si siguen la misma tendencia.

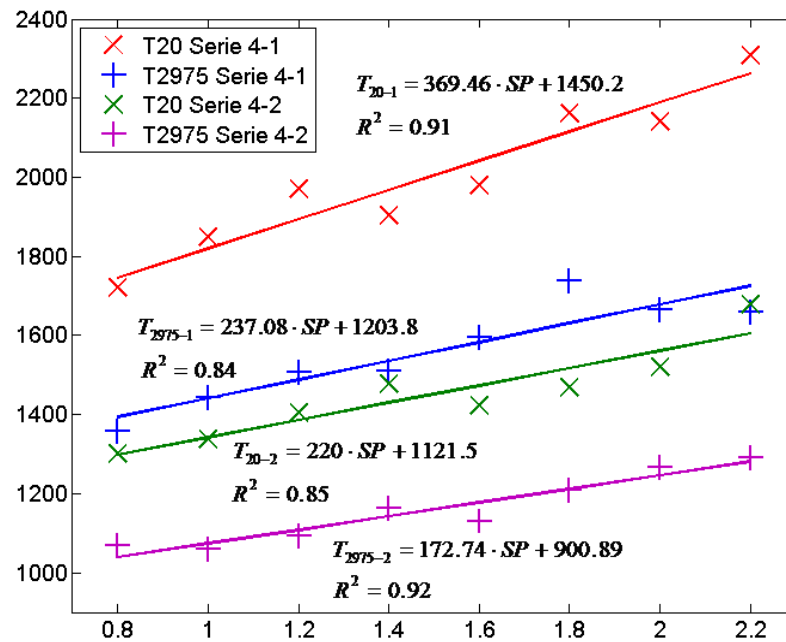


Figura 71. T_{20} y T_{2975} de la serie 4-1 y 4-2.

Sin embargo, como se ve en la figura 71, para los resultados de T_{20} y T_{2975} de las series 4-1 y 4-2 si que hay un tendencia a aumentar sus valores cuando se añade más SP G27 hasta el final de la serie, por lo que a todos los resultados se les han aproximado líneas rectas obteniéndose elevados coeficientes R^2 . Esto significa que quizás el efecto del G27 es diferente para el inicio que para el final del fraguado, o que los cálculos realizados no han sido suficientemente precisos, aunque hay dos series de resultados mostrando comportamientos similares.

A pesar de las diferencias entre los valores, en la figura 72 se representa T_{2975} en función de T_{20} , para ambos métodos, para ver si existe una relación lineal entre ellos.

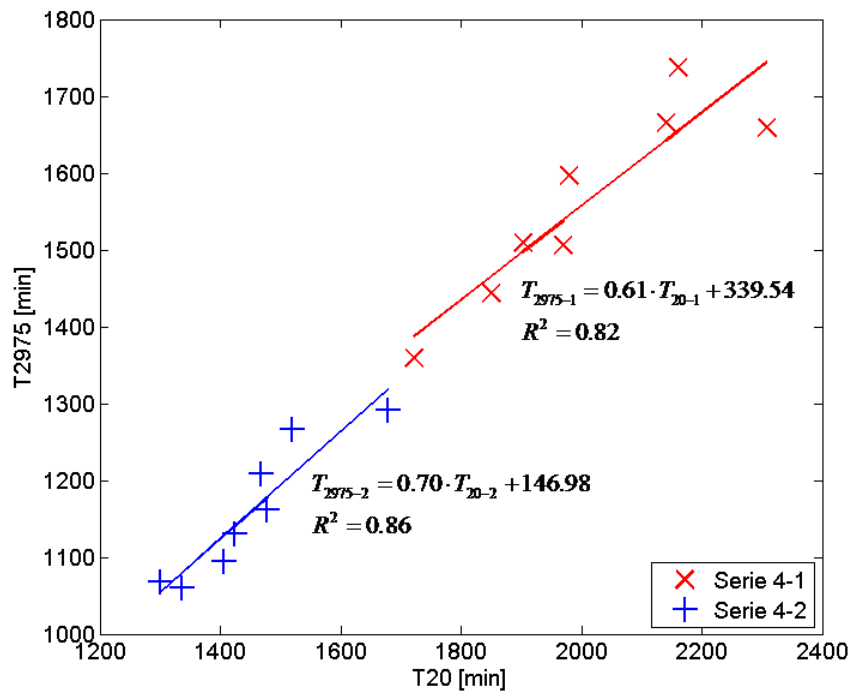


Figura 72. Comparación de T_{20} y T_{2975} de la serie 4-1 y 4-2.

Para ambas series los resultados siguen similares tendencias, y los resultados del coeficiente R^2 obtenidos en la aproximación lineal son bastante elevados.

6.5.3. Ensayos frescos

Resultados de los ensayos frescos

% SP G27	SF	FT	AC	BD
0.80	100	127	5.3	2203
1.00	100	145	5.4	2205
1.20	100	163	5.2	2200
1.40	104	185	4.8	2222
1.60	153	218	4.7	2208
1.80	186	238	4.3	2212
2.00	216	253	4.6	2218
2.20	249	269	3.7	2234

Tabla 25. Resultados de los ensayos frescos de la serie 4.

Los ensayos frescos se hicieron una vez y usando CV de la misma edad que la usada en la serie 4-2.

Ensayos de consistencia

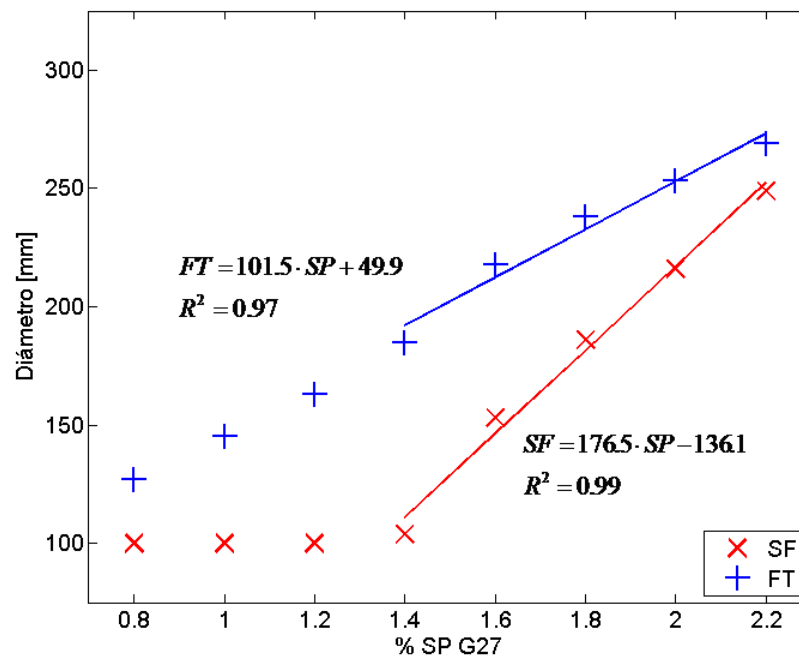


Figura 73. Ensayos de consistencia de la serie 4.

En la figura 73 se observa que para los resultados de los dos métodos de medir la consistencia se ven dos partes diferenciadas. Para las cuatro primeras mezclas (0.80%, 1.00%, 1.20% y 1.40%) la cantidad de SP no es suficiente para tener influencia en los resultados, siendo el valor de los resultados de SF el mínimo posible, 100 mm.

A partir del punto 1.40% las mezclas empiezan a comportarse como mortero autocompactante ya que son capaces de fluir por si solas, como se ve en los resultados de SF. Los diámetros van creciendo cuando se añade más SP lo que muestra el efecto del G27. Para ambos resultados se hacen sendos ajustes lineales obteniéndose coeficientes R^2 muy elevados.

En esta serie a diferencia de las otras no se ha alcanzado el punto de saturación a partir del cual la fluidez de las mezclas permanece constante aunque más SP sea añadido.

Para tratar de ver la relación entre la fluidez de las mezclas y el tiempo en el que se inicia el fraguado, según el tiempo en el que se produce el máximo gradiente, en la figura 74 se representa T_{MG-I} en función de los resultados de SF y FT.

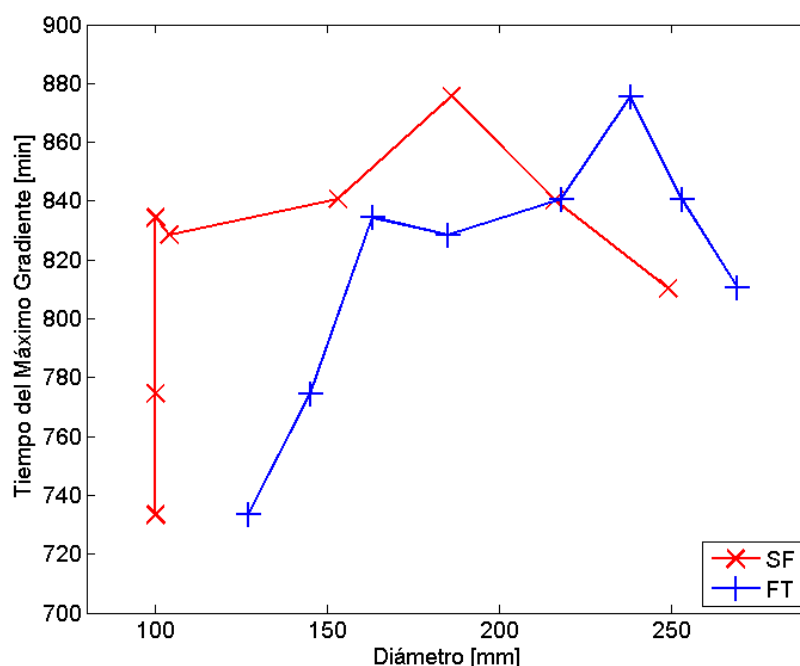


Figura 74. T_{MG} en función de SF y FT de la serie 4.

Debido a que los resultados de T_{MG} son muy irregulares no existe una relación clara entre T_{MG} y la fluidez de las mezclas. Si se observa la comparación con los resultados de FT (en los de SF esto no se aprecia porque las primeras mezclas valían lo mínimo posible, 100 mm) se ve que hasta la mezcla con 1.80% de SP G27 según las mezclas son más fluidas su valor T_{MG} es mayor, pero como después estos descienden la tendencia general se rompe.

Ensayos de contenido en aire y densidad

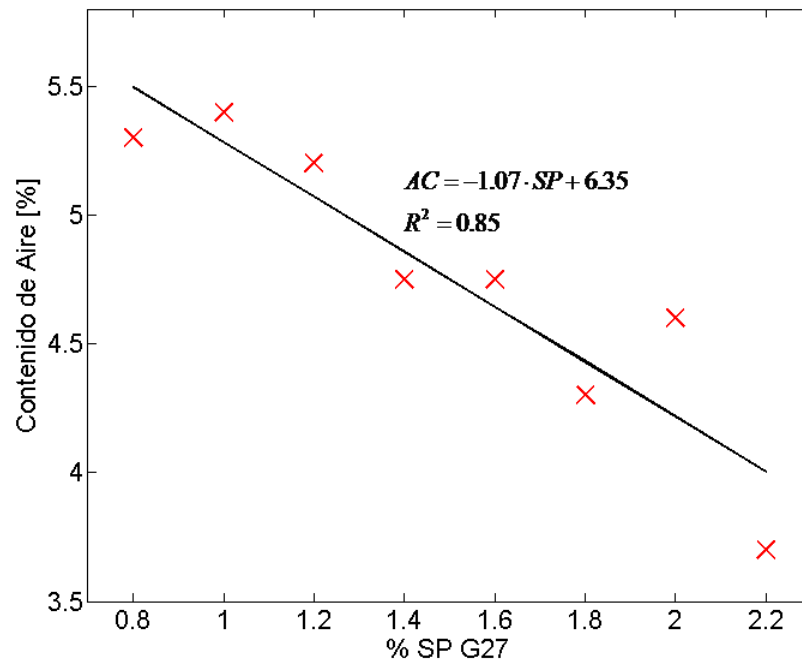


Figura 75. Contenido en aire de la serie 4.

La figura 75 muestra que el contenido en aire de las mezclas baja cuando más SP es añadido. Se ha aproximado una línea recta a los resultados obteniéndose un coeficiente R^2 bastante elevado.

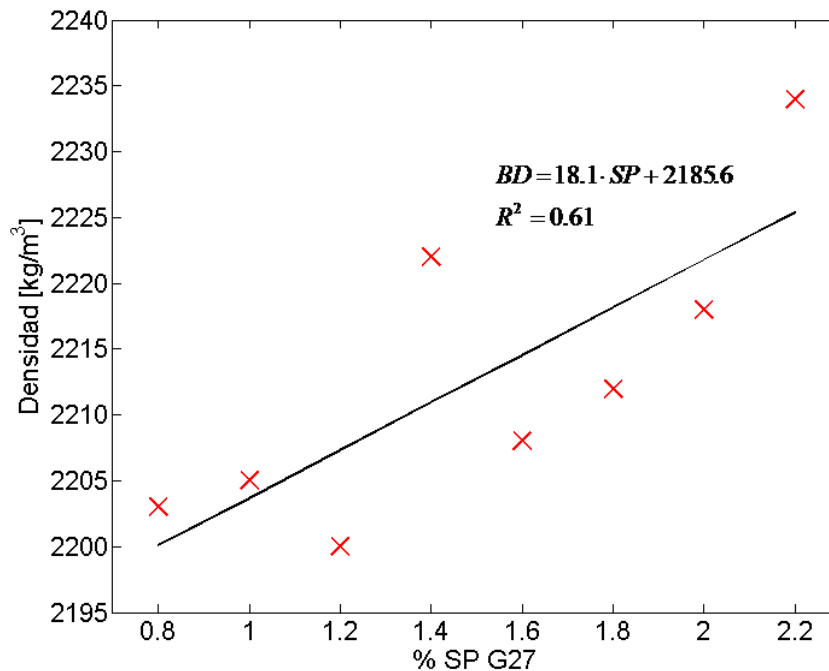


Figura 76. Densidad de la serie 4.

La tendencia general de los resultados del ensayo de densidad de esta serie es que las mezclas son más densas cuando SP es añadido a ellas, como era esperado ya que como se ve en la figura 75 estas van teniendo menos aire. Hay bastantes picos y puntos en contra de la tendencia general pero esto puede ser explicado por que las diferencias entre las densidades de esta serie son pequeñas (134 g es la diferencia entre la más y la menos densa) y el método usado para medir la densidad, en este caso el segundo procedimiento, no debería ser suficientemente preciso para esas diferencias. Debido a esto el coeficiente R^2 del ajuste lineal realizado es bastante bajo.

A continuación, en la figura 77, se representa el contenido en aire en función de la densidad para comprobar la relación que existe entre estos.

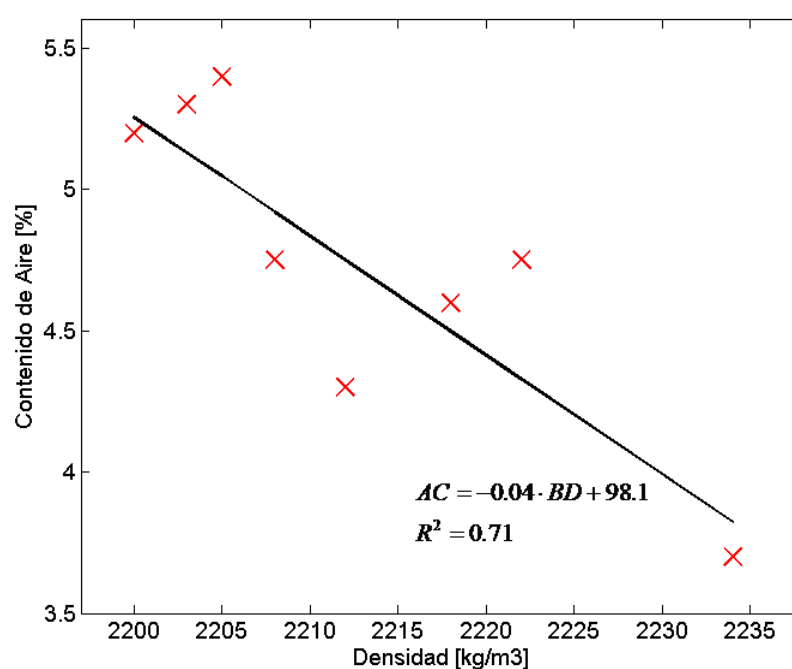


Figura 77. Contenido en aire en función de la densidad de la serie 4.

La tendencia general es que cuando las mezclas de mortero tienen menos aire son más densas, es decir, que existe una relación inversa entre ambas medidas. Al hacer un ajuste lineal se obtiene un coeficiente R^2 bastante pequeño, lo cual podría ser debido a las imprecisiones en las medidas, especialmente en los ensayos de densidad, aunque también podría ser que la relación entre ambas medidas no tenga una dependencia lineal para esta serie.

6.6. Comparación entre el Glenium 51 y el Glenium 27

Para comparar los dos tipos de SP usados en este trabajo se va a representar gráficas combinadas de la serie 3 y 4, pero esta vez serán mostradas en función del % de componentes reactivos presentes en el SP respecto de la masa de cemento. Como ya se dijo el G51 tiene un 35% de componentes reactivos mientras que el G27 tiene un 20%.

6.6.1. Inicio del fraguado

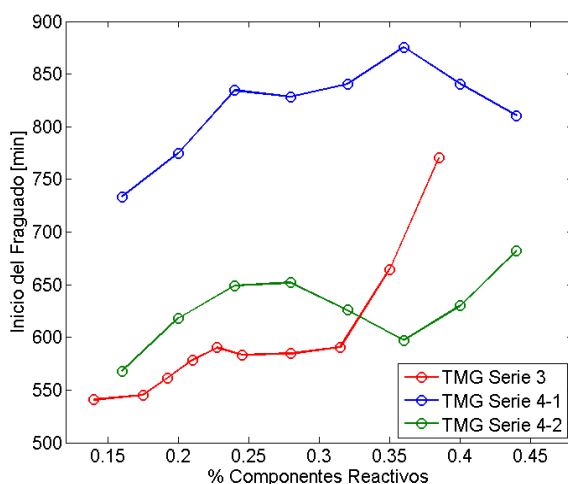


Figura 78. T_{MG} de las series 3, 4-1 y 4-2.

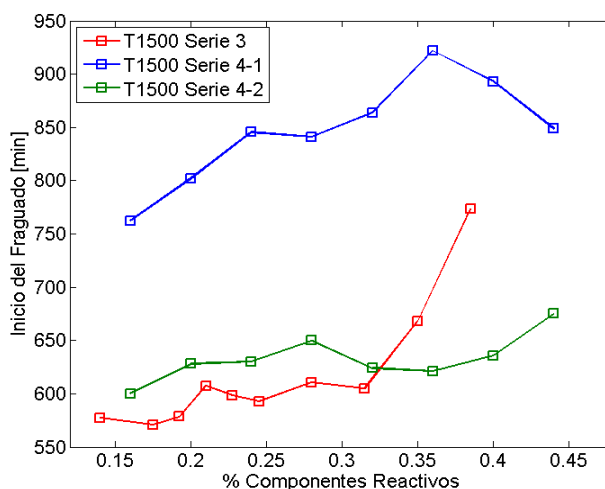


Figura 79. T_{1500} de las series 3, 4-1 y 4-2.

Como ya fue dicho la serie 3 fue hecha con G51 mientras que la 4-1 y la 4-2 con G27. Además la serie 4-2 fue hecha con CV que estuvieron 4 meses más expuestas a las condiciones atmosféricas. Sin embargo las CV de la serie 3 solo estuvieron 1 mes más expuestas a las condiciones atmosféricas que las de la serie 4-2 y como se puede ver los resultados, mostrados en las figuras 78 y 79, son bastante similares en cuanto a sus resultados de T_{MG} y T_{1500} , siendo estos tiempos algo mayores para la serie 4-1 hasta que comienza el crecimiento acelerado de la serie 3. Además como ya se dijo el efecto del

G27 en cuanto al inicio del fraguado es casi constante a partir de aproximadamente 0.25%, por lo que las curvas se cruzan. El cruce de las curvas tanto de los resultados de T_{MG} como de T_{1500} se produce aproximadamente en el punto 0.32%.

En cuanto a la serie 4-1 es difícil hacer comparaciones con las demás series por la edad de las CV.

6.6.2. Final del fraguado

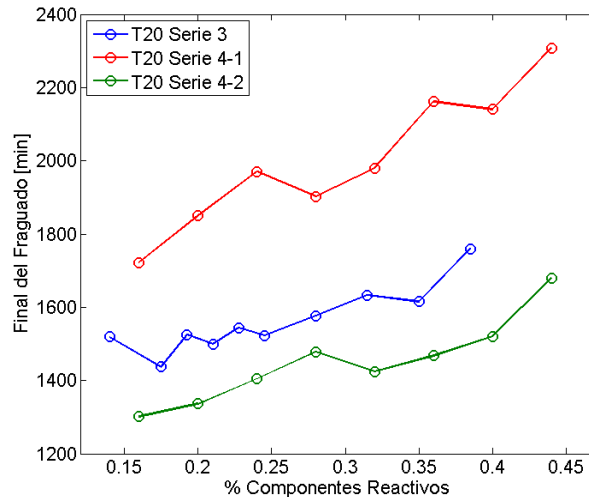


Figura 80. T_{20} de las series 3, 4-1 y 4-2.

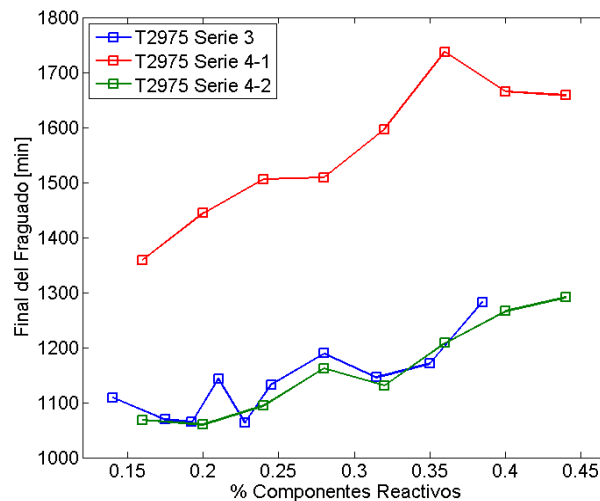


Figura 81. T_{2975} de las series 3, 4-1 y 4-2.

Para los resultados de los parámetros indicadores del final del fraguado se aprecia que la serie 3 y la 4-1 tienen valores bastante similares, especialmente para los resultados del parámetro T_{2975} , donde las curvas se cruzan en 6 puntos. Para los resultados de T_{20} los resultados de la serie 3 son algo mayores en todos los puntos, al contrario de lo que pasaba en los resultados del inicio del fraguado, donde en la mayor parte de la curva los

tiempos más altos correspondían a la serie 4-1. En cuanto a la serie 4-2, de nuevo, los valores son mucho más elevados que el resto.

Por lo tanto, los resultados T_{MG} y T_{1500} muestran que el inicio del fraguado llega más tarde cuando se usa G27, hasta que empieza el crecimiento acelerado de la serie 3, alrededor del punto 0.32%. Para el final del fraguado los resultados para ambas series son mucho más similares, de hecho según el parámetro T_{2975} los tiempos calculados son casi los mismos, aunque para T_{20} son algo mayores los de las mezclas donde se usa SP G51.

6.6.3. Ensayos de consistencia

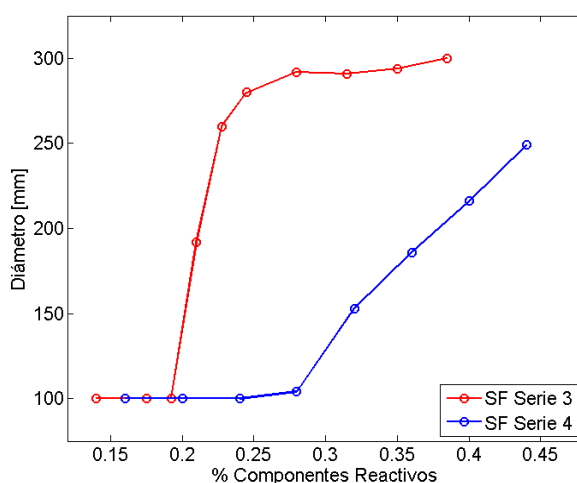


Figura 82. SF de las series 3, 4-1 y 4-2.

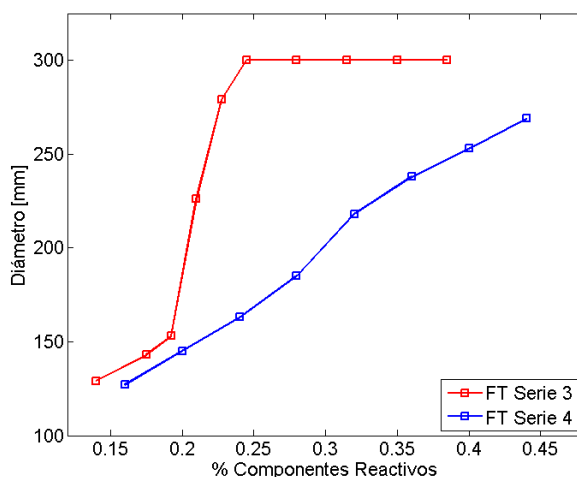


Figura 83. FT de las series 3, 4-1 y 4-2.

En las figuras 82 y 83 se observa claramente que la influencia del G51 en la fluidez del mortero es mucho mayor que la del G27. Alrededor del punto 0.25% de componentes reactivos se alcanza el punto de saturación de la serie 3 y a partir de ahí su fluidez permanece aproximadamente constante, de hecho, los resultados de FT más allá de

0.25% son los máximos posibles, 300 mm. Para la serie 4 los resultados son en todo momento más bajos, y de hecho no se alcanza un punto de saturación como en la serie 3 a pesar de que se llegó hasta el punto 0.44%.

La mayor influencia del G51 también se puede ver en el principio de las curvas, para la serie 3 las mezclas empiezan a fluir por si solas, como se puede ver en los ensayos SF, a partir del punto 0.20%; mientras que para la serie 4-1 esto pasa aproximadamente a partir del punto 0.28%.

La zona de influencia del SP en cuanto a la fluidez de las mezclas es, sin embargo, mucho más pequeña para el G51, ya que va desde 0.20% (donde empieza a fluir) hasta 0.25% (punto de saturación), mientras que para el G27 va desde 0.28% hasta un punto no conocido, pero que con 0.48% todavía no se ha alcanzado.

6.6.4. Ensayos de contenido de aire y densidad

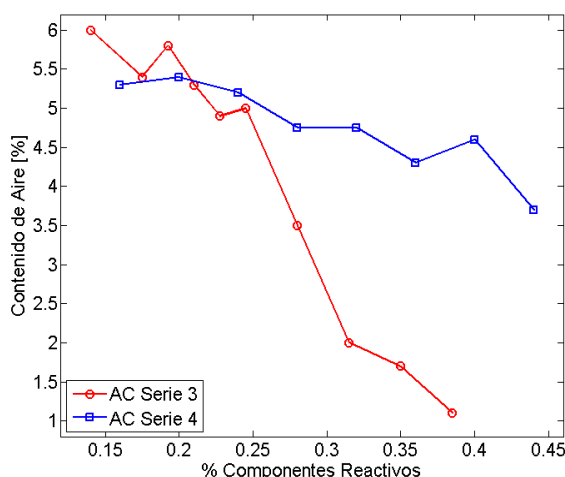


Figura 84. AC de las series 3, 4-1 y 4-2.

Como se ve en la figura 84, en general la influencia del SP G51 es mucho mayor que la del G27 en los ensayos de contenido en aire. En el principio de las curvas de resultados, hasta aproximadamente el punto 0.22%, las mezclas de la serie 3 donde se usó G51 parecen tener más aire que las de la serie 4, aunque el tercer punto de la serie 3 parece tener un valor más alto de lo que debería, por lo tanto este cruce podría estar antes del punto 0.22%. A partir de este punto el contenido en aire de las mezclas de la serie 3 decrece mucho más rápido que el de la serie 4.

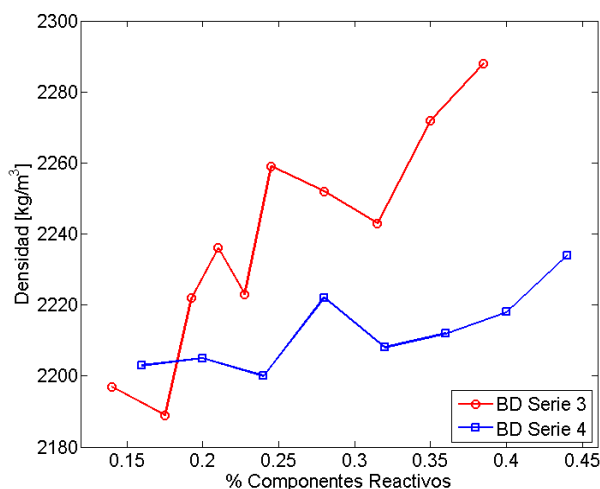


Figura 85. BD de las series 3, 4-1 y 4-2.

Como era de esperar en general las mezclas de la serie 3 son más densas que los de la serie 4, ya que como se mostró en la figura 84, estas tienen menos aire. Se dijo que al principio de los resultados del contenido en aire las mezclas de la serie 3 tenían más aire, y aquí se ve que en esta parte las mezclas de la serie 3 son menos densas. El cruce entre las dos curvas para los ensayos de densidad está aproximadamente en 0.18%, mientras que en los ensayos de contenido en aire esta alrededor de 0.22%, pero ya fue dicho que esto podía ser debido a un punto que está demasiado alto y que probablemente ese cruce estaría más bajo.

Para el resto de la curva, a pesar de que los resultados de esta prueba presentan muchos picos e irregularidades por los motivos anteriormente citados, se ve un aumento de la densidad más fuerte para los resultados de la serie 3 donde se usó G51.

Por lo tanto, como muestran los resultados de los ensayos frescos, el efecto dispersor de los granos de cemento del G51 es mayor que el del G27 justo después de que el mortero haya sido mezclado, que es cuando se realizan estos ensayos. Esto se ve porque las mezclas son mucho más fluidas y densas, y tienen menos aire.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

Por lo mostrado por los resultados obtenidos durante la realización de este trabajo se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Se considera válido el algoritmo utilizado para calcular los parámetros indicadores del fraguado. Esto es así, ya que al usarlo en las cuatro curvas de referencia, las diferencias entre el valor de T_{MG} calculado y el real no exceden el 1% en tres de esas curvas. Para la curva restante la diferencia es de 2.31%, pero esta es más complicada por tener dos puntos de inflexión. Además se comprobó que el orden del polinomio a penas tiene influencia en los resultados cuando este es mayor que 30.
- Para todas las series los resultados de T_{MG} y T_{1500} han mostrado tendencias y valores similares; siendo las diferencias de media de sus valores por serie: 4.4%, 4.5%, 3.0%, 3.7% y 2.0%. Sin embargo las diferencias entre los resultados de los parámetros T_{20} y T_{2975} han sido bastante mayores; siendo estas de media por serie: 26.9%, 27.6%, 27.3%, 22.1% y 20.0%, aunque las tendencias mostradas por los resultados de ambos métodos son similares en todas las series.
- Las CV muestran un claro efecto retardador del fraguado según los resultados de T_{MG} y T_{1500} de la serie 1 y 2, y según los resultados de T_{20} y T_{2975} de la serie 1. Además los resultados muestran que la adición de este material provoca mezclas menos fluidas, con más aire y más densas.
- El G51 provoca un retraso del inicio y fin del fraguado según la serie 3; y hace que las mezclas sean más fluidas, con menos aire y más densas.
- Los resultados de la serie 4-1 y 4-2 muestran que al añadir G27 se retrasa el final del fraguado. Sin embargo, para el inicio del fraguado la adición de G27 no parece tener una influencia clara a partir de mezclas con aproximadamente 1.20% de SP sobre la masa de cemento. Además al añadir G27 las mezclas son más fluidas, con menos aire y más densas.
- La diferencia principal entre ambos SP está en que el G51 provoca una dispersión inicial de los granos de cemento más fuerte; dando lugar a mezclas más fluidas, con menos aire y más densas.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.M. Illston, P.L.J. Domone. *Constructions materials. Their nature and behaviour*. Spon Press. 2001.
- [2] M. Fernández Cánovas. *Hormigón*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2004.
- [3] M.S. Shetty. *Concrete technology: theory and practice*. S. Chand & Company LTD. 2005.
- [4] E. F. Brayo, A. E. Cornejo. *Apuntes: Material, Cemento Portland*.
- [5] G. De Schutter, P.J.M. Bartos, P. Domone, J. Gibbs. *Self-Compacting Concrete*. Whittles Publishing. 2008.
- [6] J.Newman, B.S. Choo. *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials*. Ed. Elsevier Science. 2003.
- [7] B. M. Lempriere. *Ultrasound and Elastic Waves*. Elsevier Science. 2002
- [8] N. Robeyst, E. Gruyaert, C.U. Grosse, N. De Belie. *Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity*. Cement and Concrete Research. Elsevier. 2008.
- [9] Bram Desmet, Kelly Chrysanthé Atitung, Miguel Angel Abril Sánchez, John Vantomme, Dimitri Feys, Nicolás Robeyst, Katrien Audenaert, Geert De Schutter, Veerle Boel, Gert Heirman, Ozlem Cizer, Lucie Vandewalle, Dionys Van Gemert. *Monitoring the early-age hydration of self-compacting concrete using ultrasonic p-wave transmission and isothermal calorimetry*. SCC2010 conference. Montreal. Septiembre 2010.
- [10] B. Desmet, S. Group, J. Vantomme, G. De Schutter, K. Lesage, L. Vandewalle. *Parametric Study of the Effects of the Composition on the Setting of Self-Compacting Mortar, using Continuous Ultrasonic Monitoring*. SCC2010 conference. Montreal. Septiembre 2010.
- [11] E.J. Garbozi, D. P. Bentz. *Percolation aspects of cement paste and concrete. Properties and durability*. High performance concrete: research to practice, American Concrete Institute. 1999.
- [12] DS/EN 1015-3:1999 *Methods of test for mortar for masonry: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*.



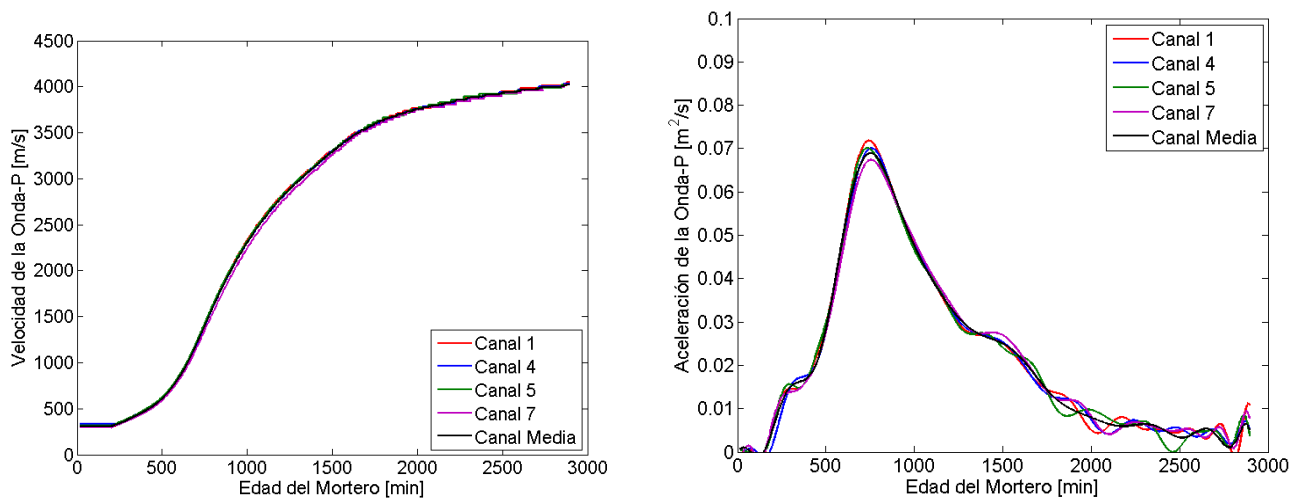
- [13] DS/EN 1015-3:1999 *Methods of test for mortar for masonry: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).*
- [14] DS/EN 1015-7:1999 *Methods of test for mortar for masonry: Determination of air content of fresh mortar.*
- [15] DS/EN 1015-6:1999 *Methods of test for mortar for masonry: Determination of bulk density of fresh mortar.*
- [16] L. Willain. *Optimalisation de la méthodologie d'analyse des données continues d'essais ultrasoniques sur béton et mortier.* Proyecto fin de master. École Royale Militaire. Bruselas 2010.

ANEXOS

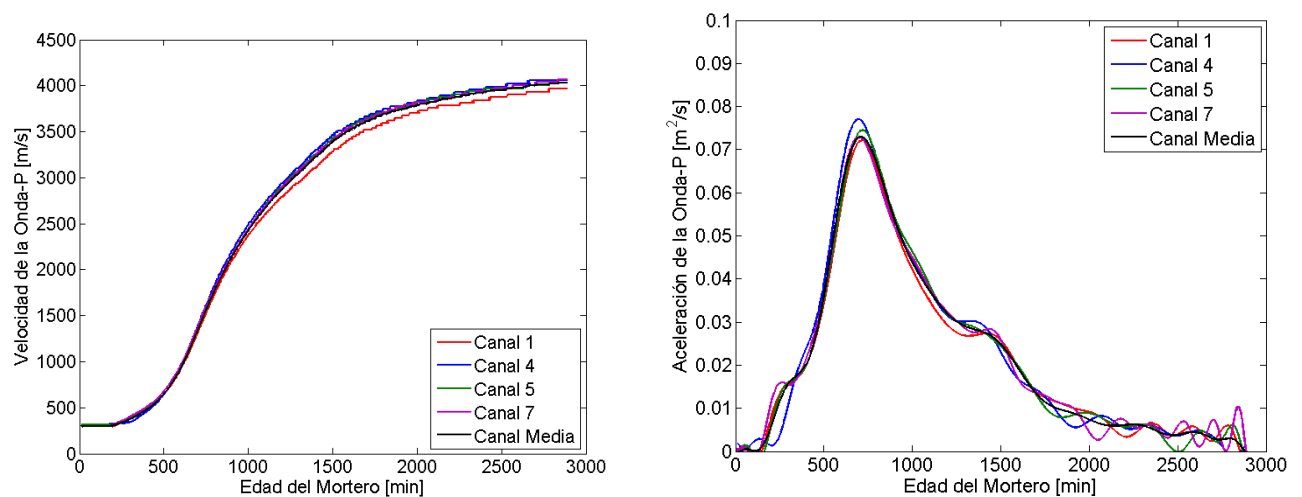
Anexo A: curvas de velocidad y gradiente

Serie 1

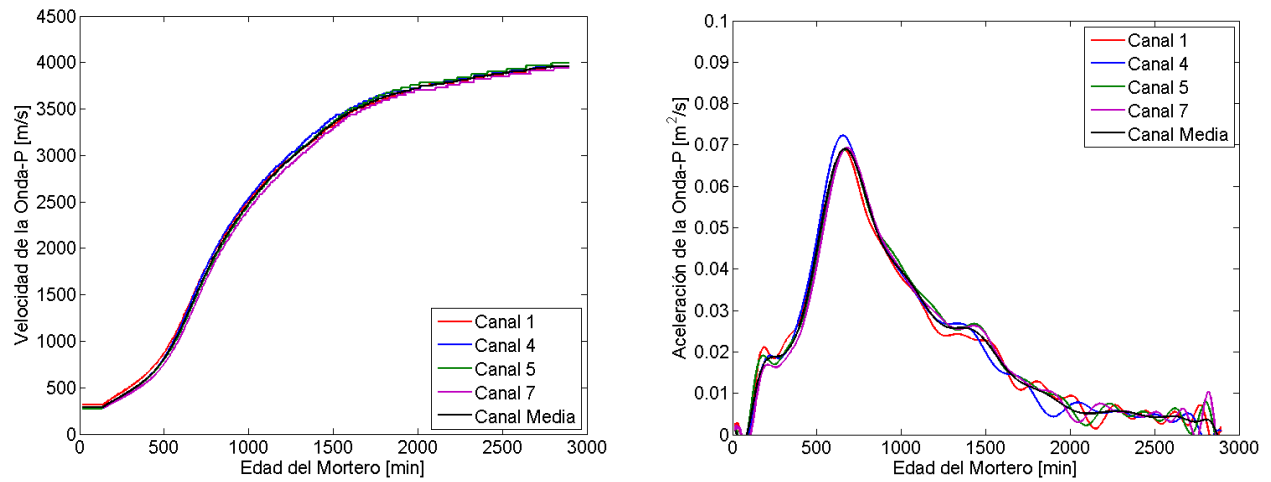
Mezcla 0.662



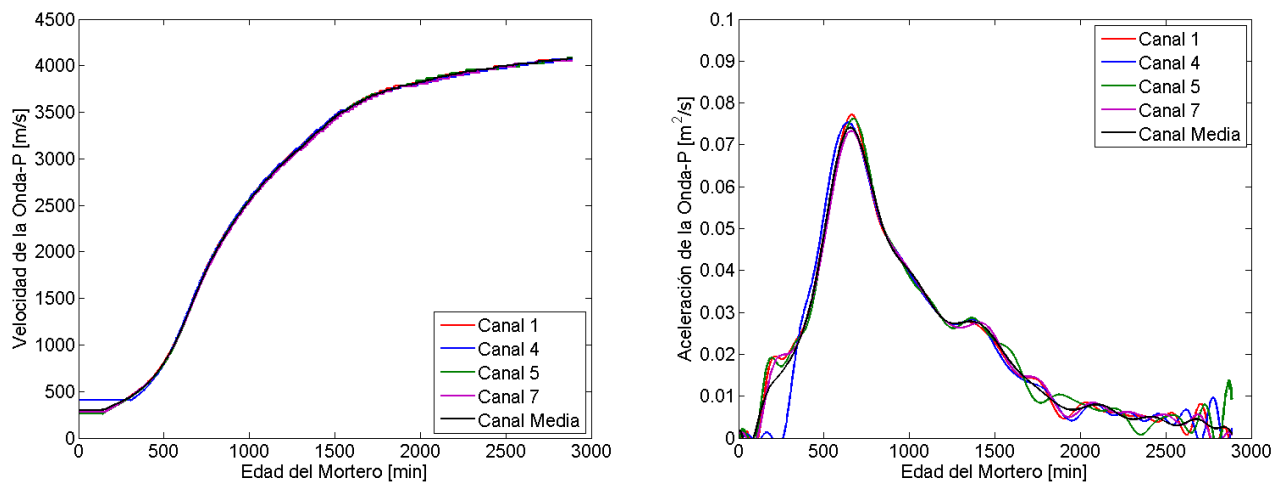
Mezcla 0.682



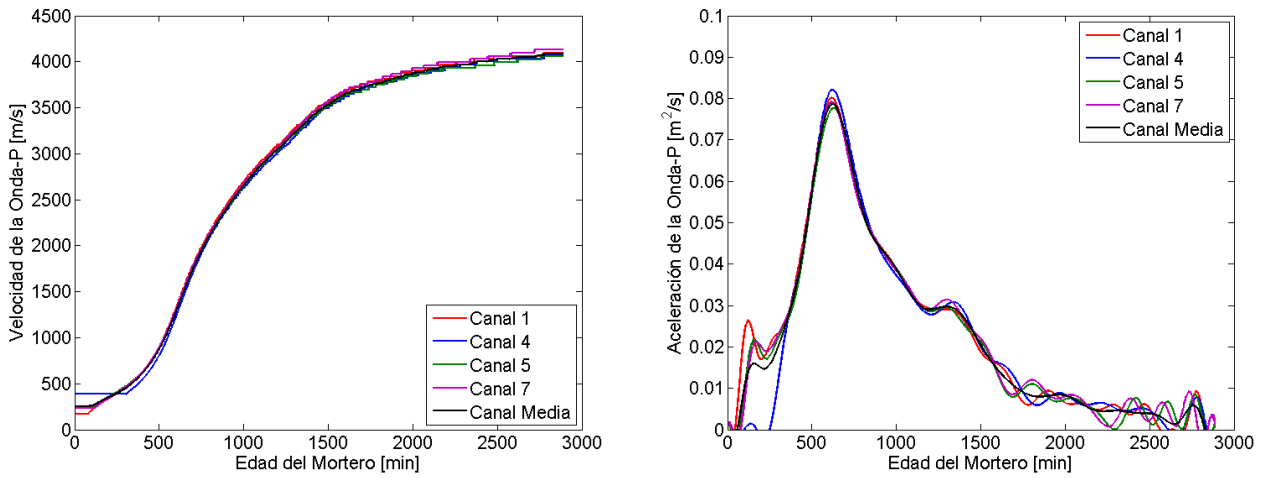
Mezcla 0.703



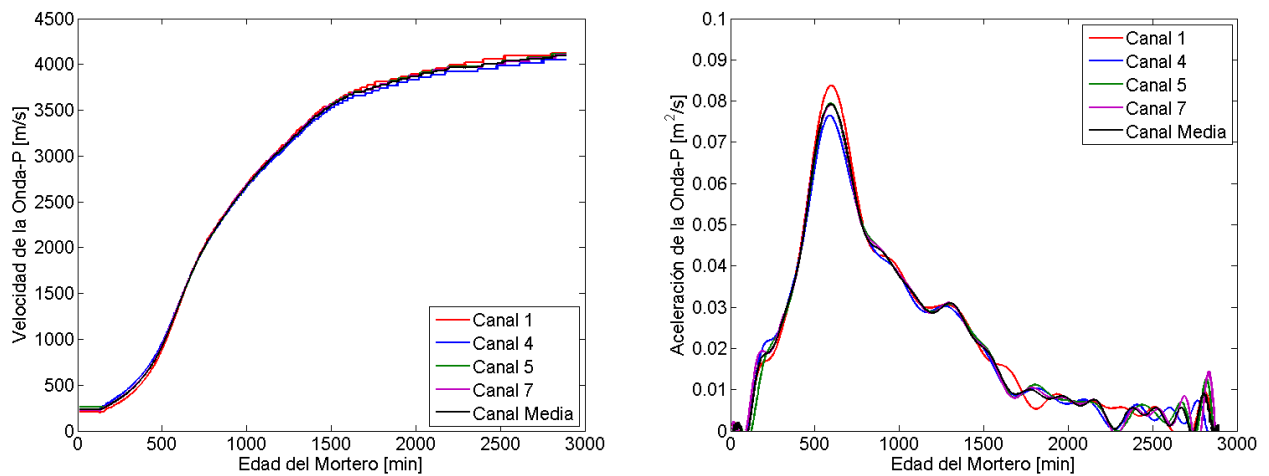
Mezcla 0.726



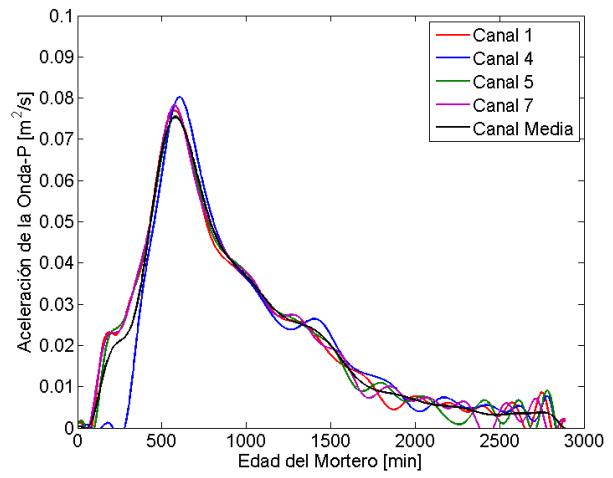
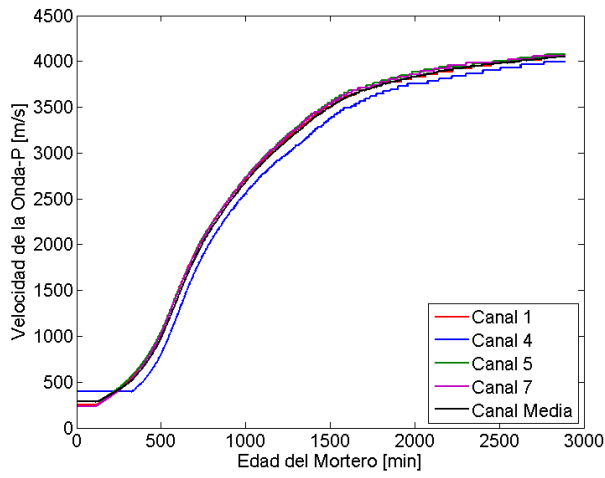
Mezcla 0.750



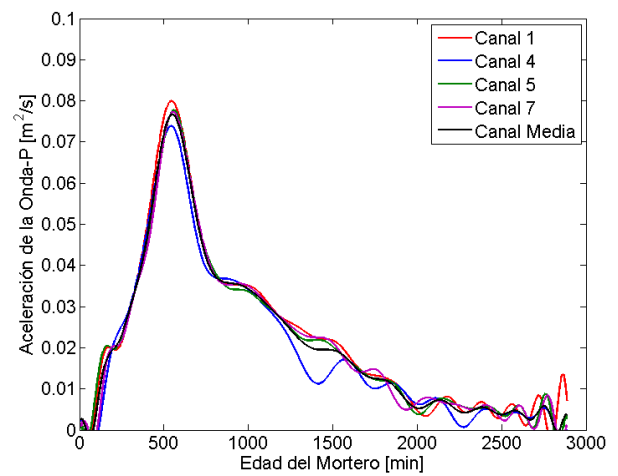
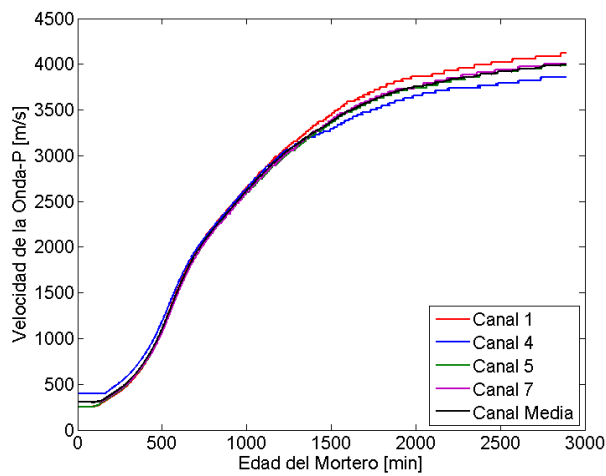
Mezcla 0.776



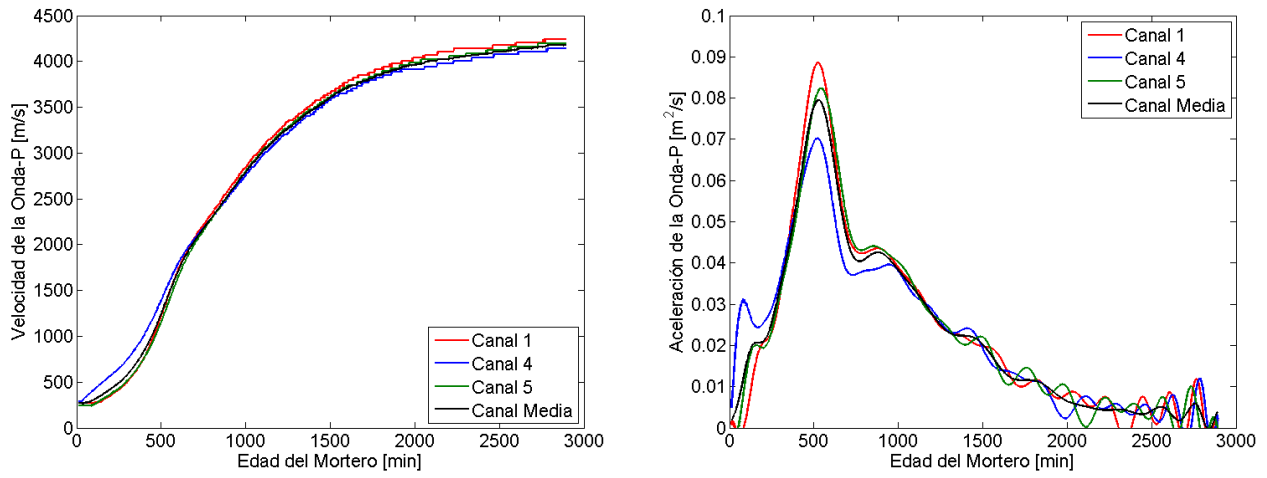
Mezcla 0.804



Mezcla 0.833

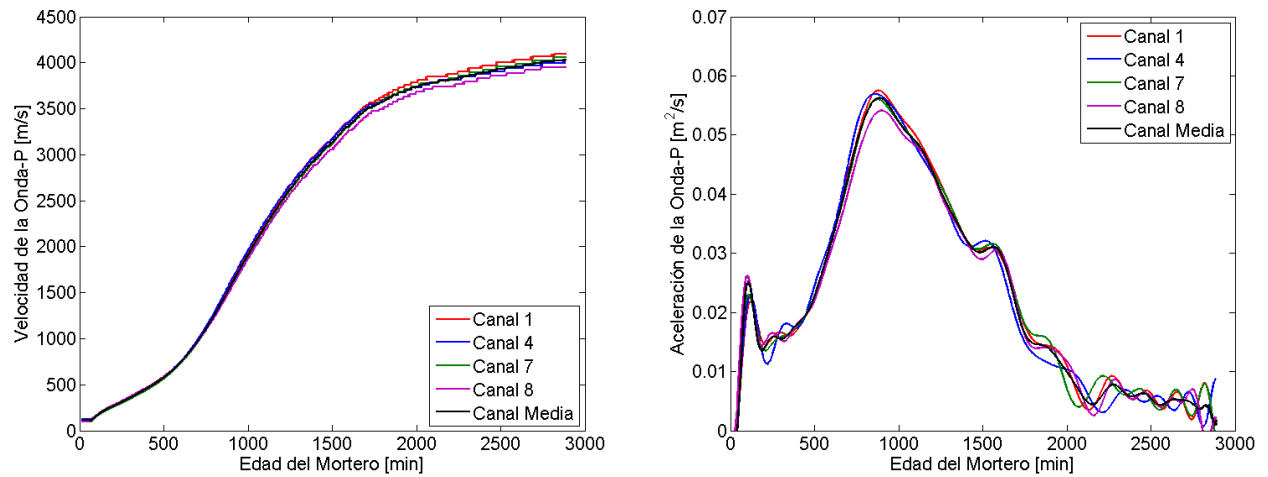


Mezcla 0.865

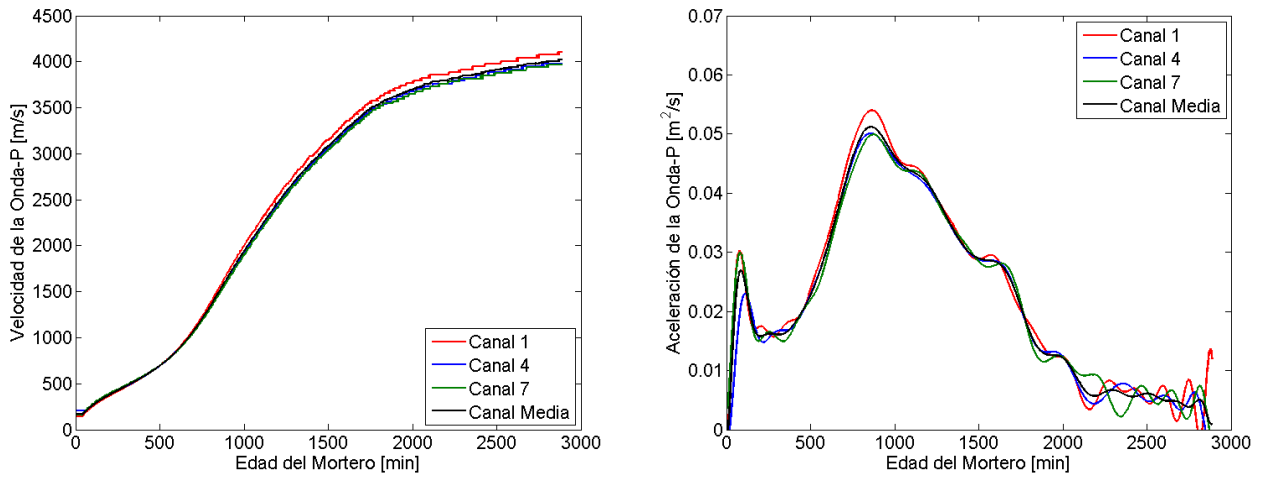


Serie 2

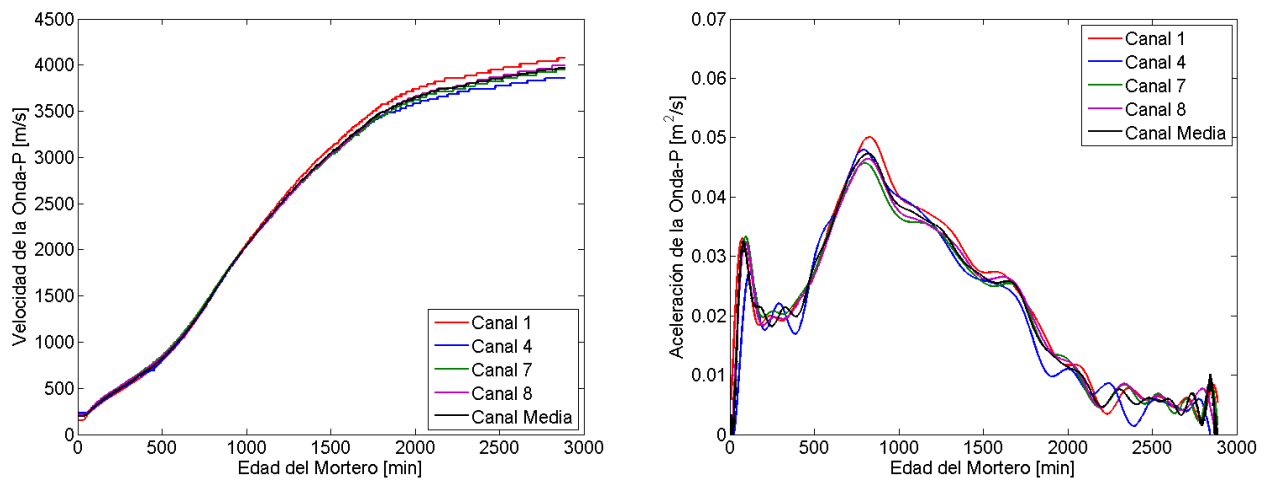
Mezcla 0.643

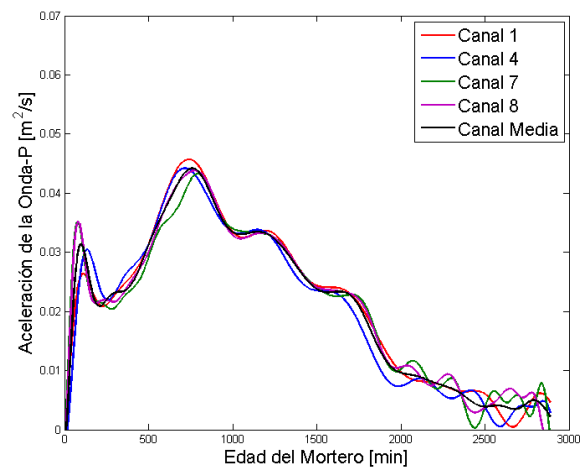
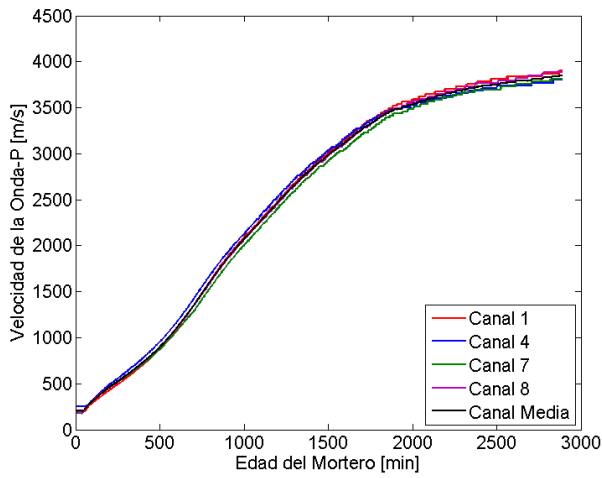
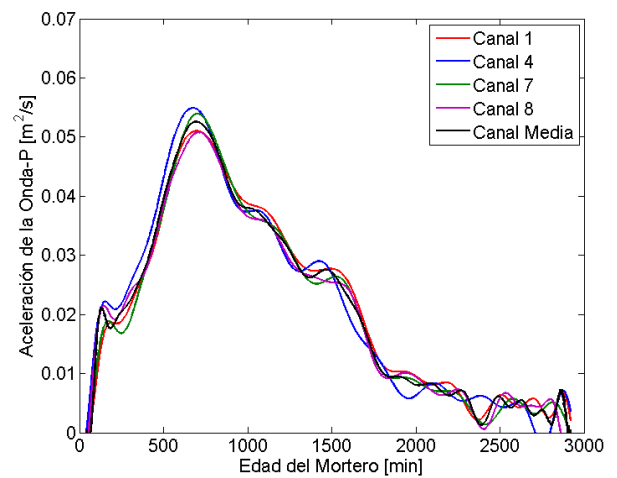
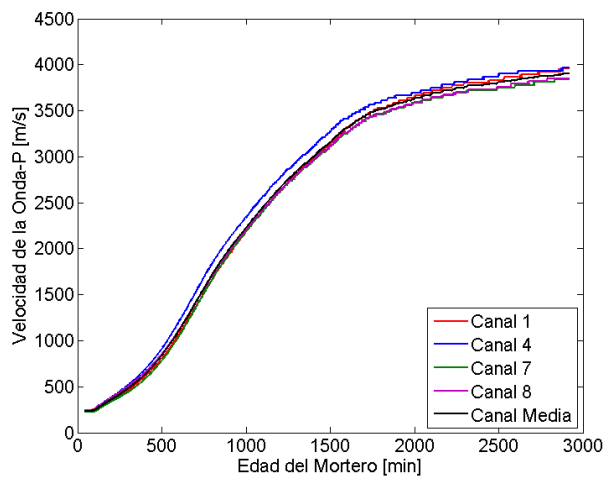


Mezcla 0.667

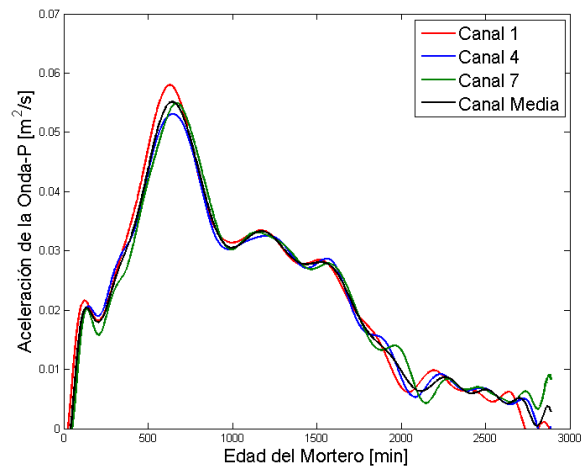
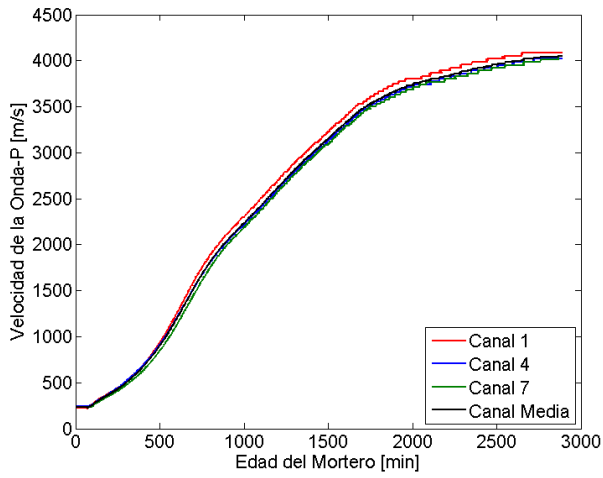


Mezcla 0.692

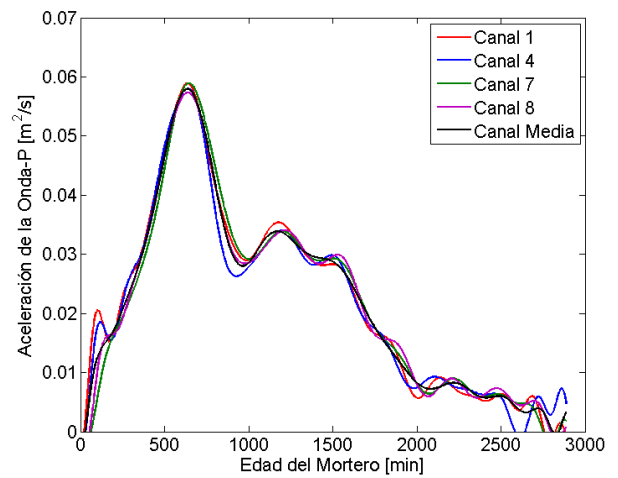
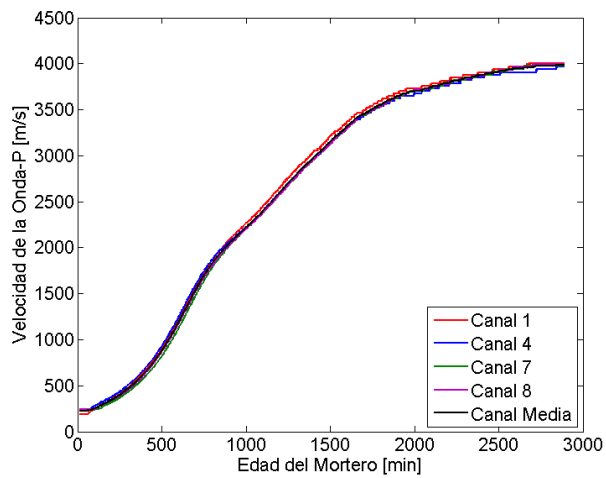


Mezcla 0.720Mezcla 0.750

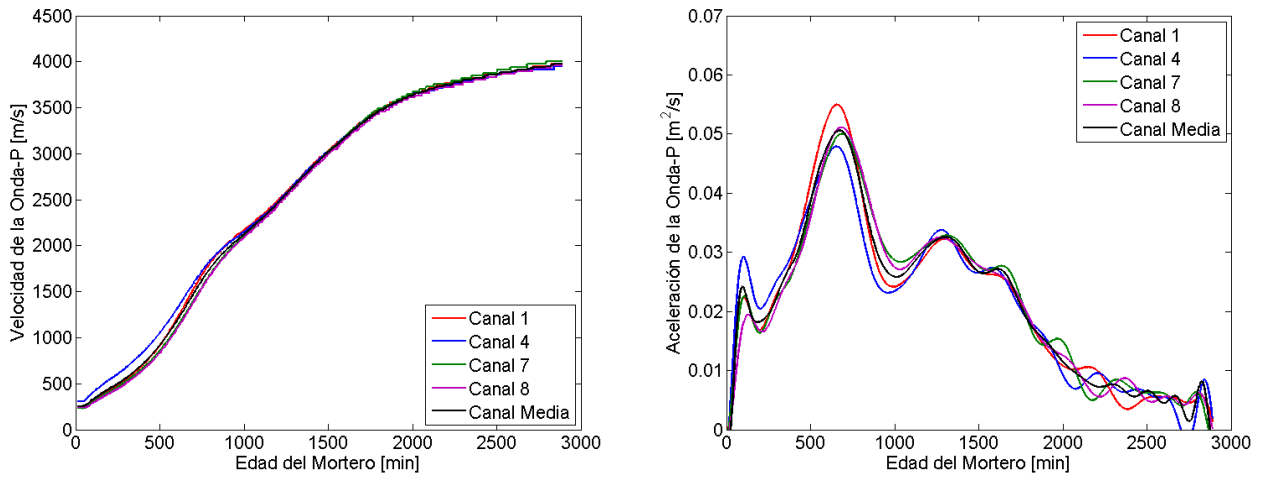
Mezcla 0.783



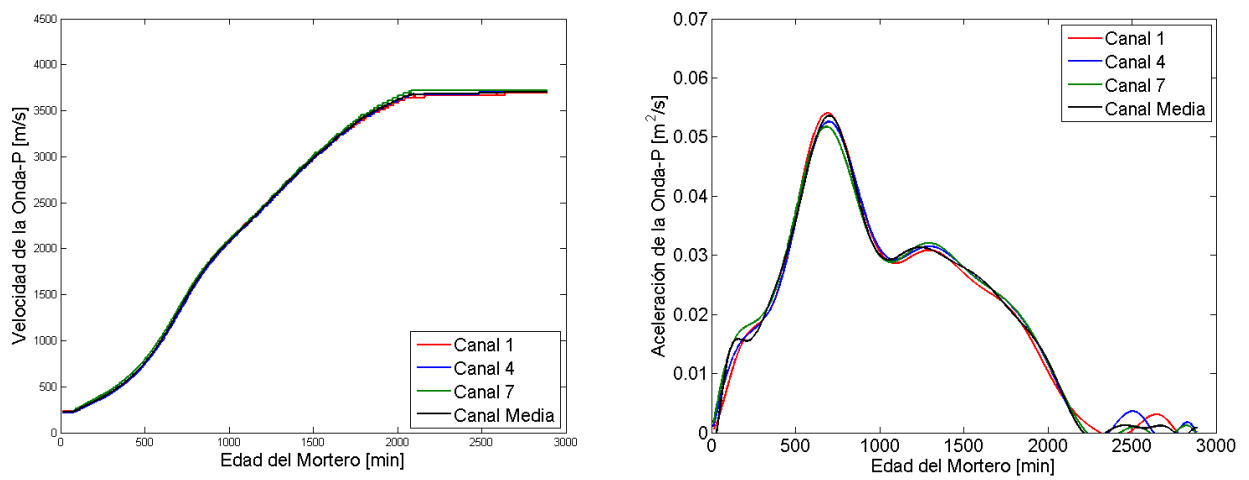
Mezcla 0.818



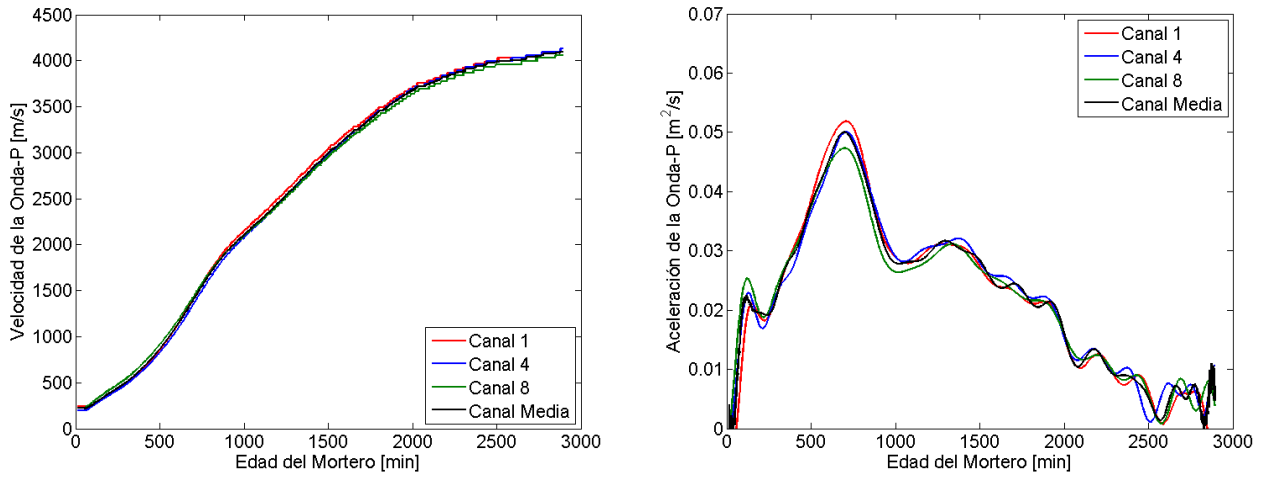
Mezcla 0.837



Mezcla 0.857

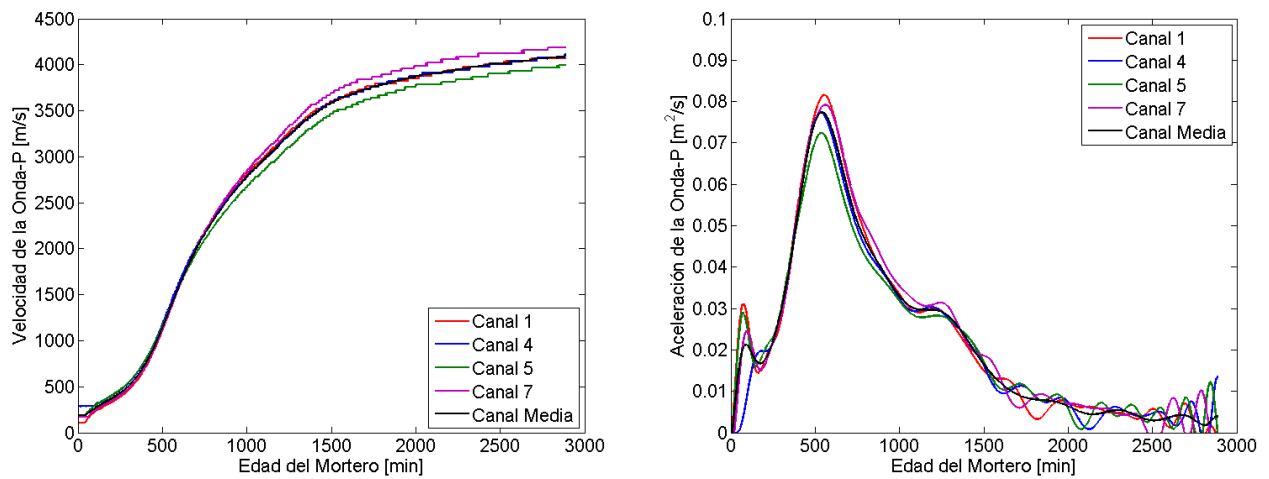


Mezcla 0.900

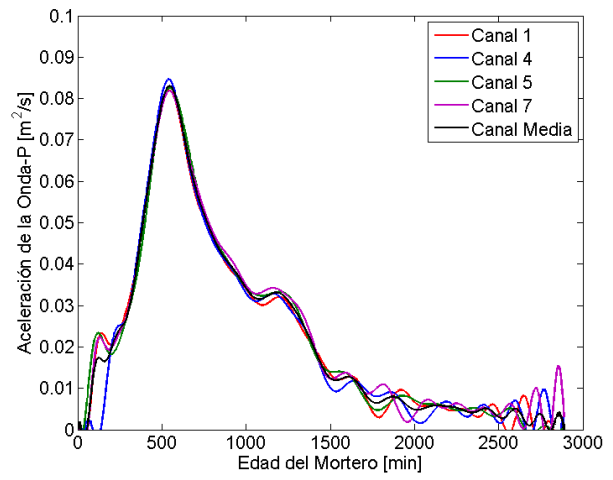
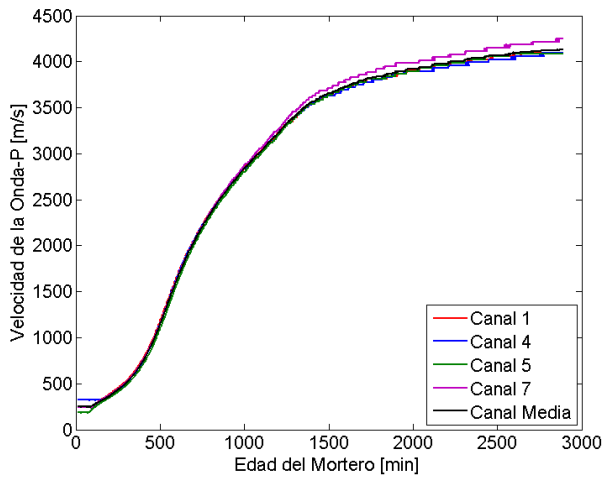


Serie 3

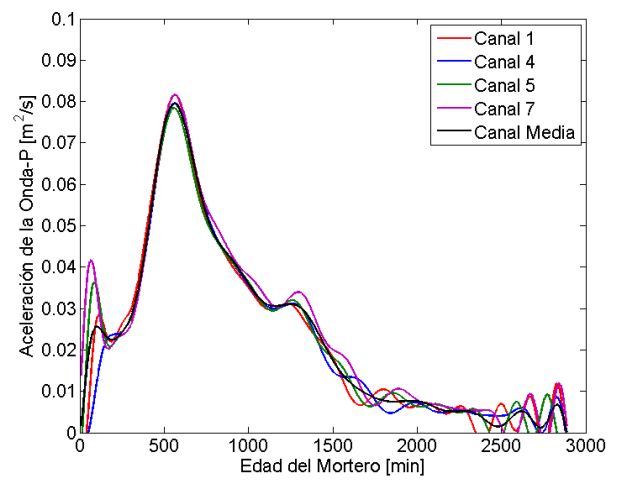
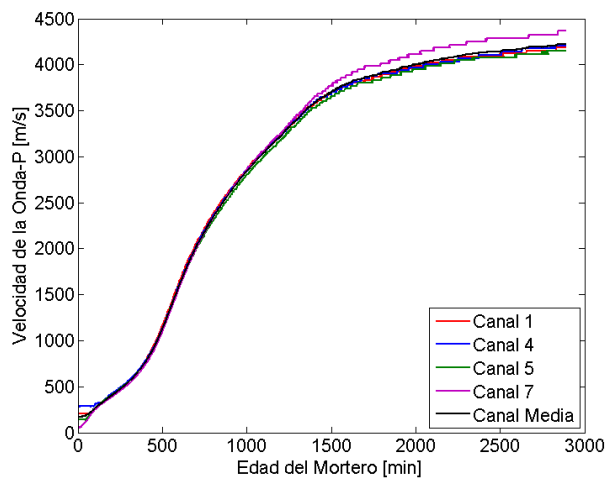
Mezcla 0.40%



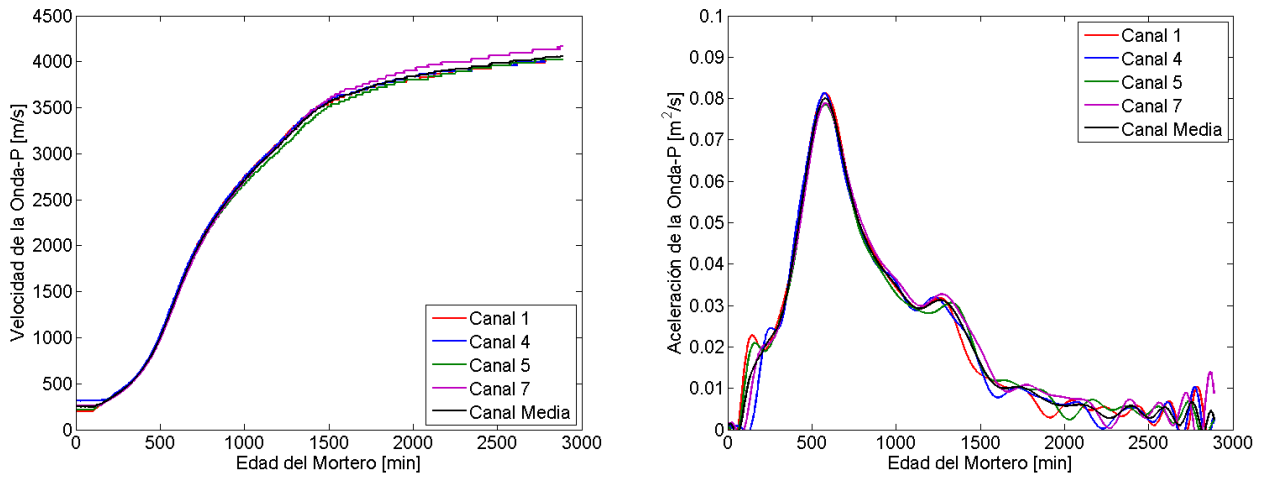
Mezcla 0.50%



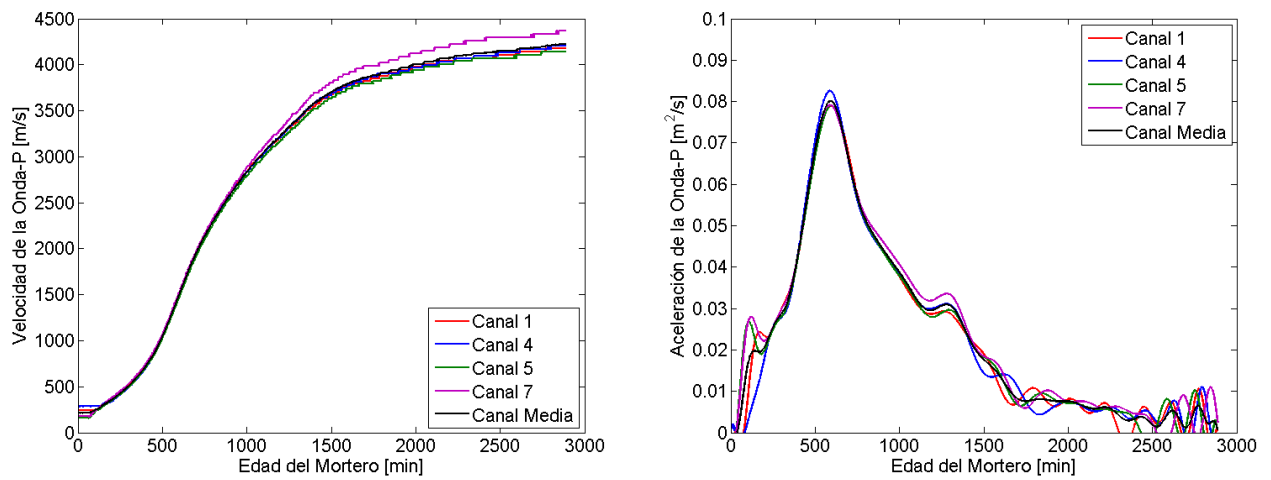
Mezcla 0.55%



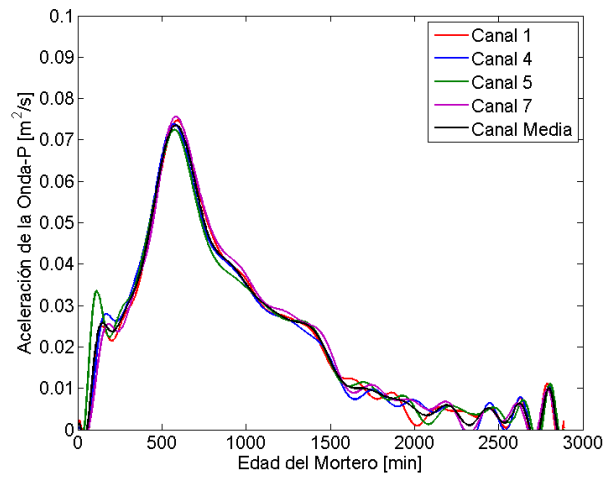
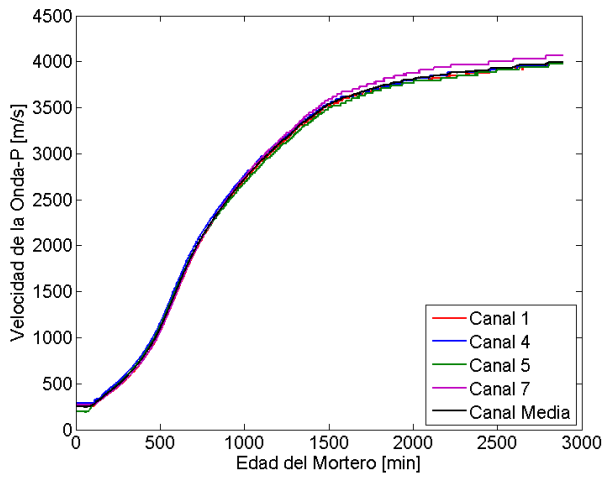
Mezcla 0.60%



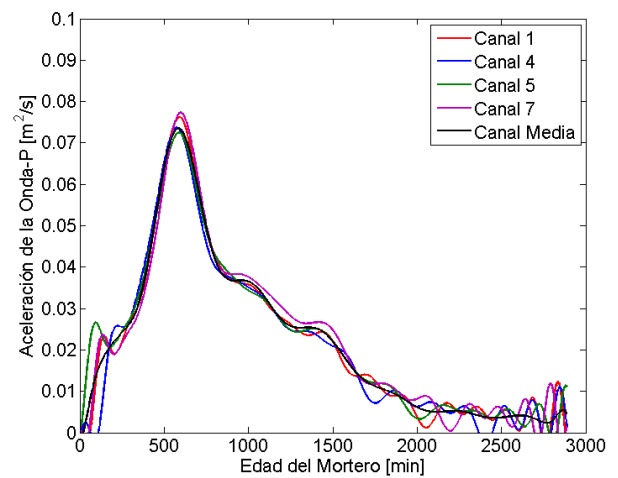
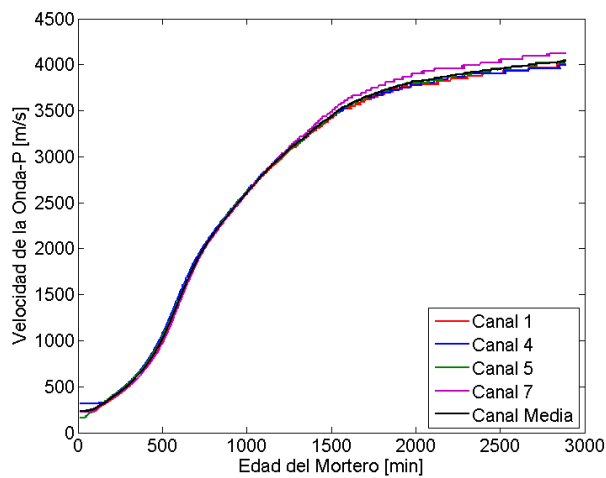
Mezcla 0.65%

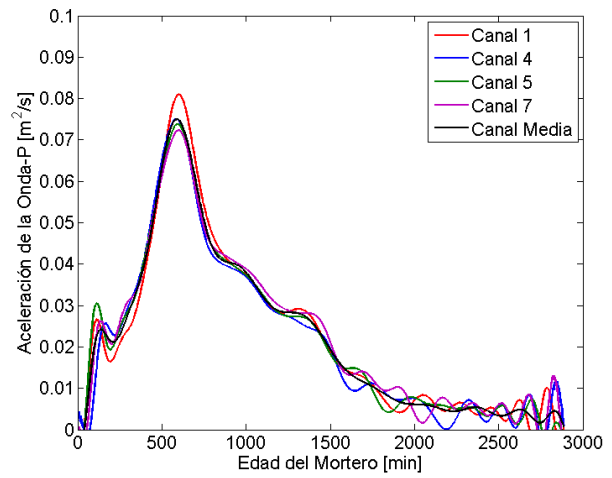
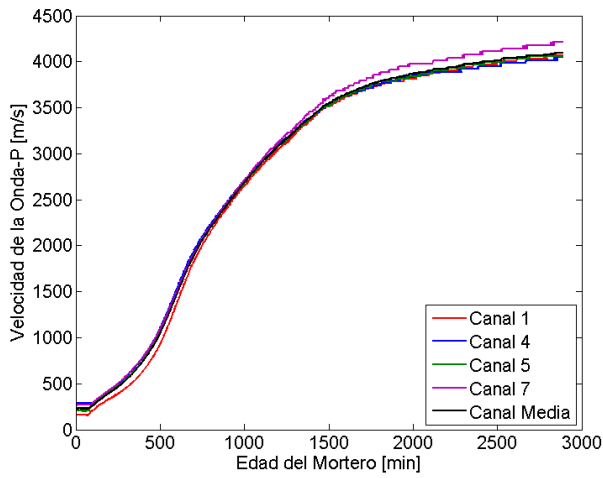
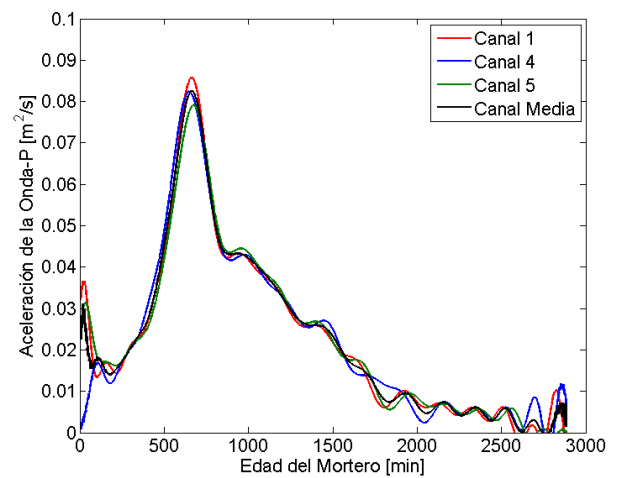
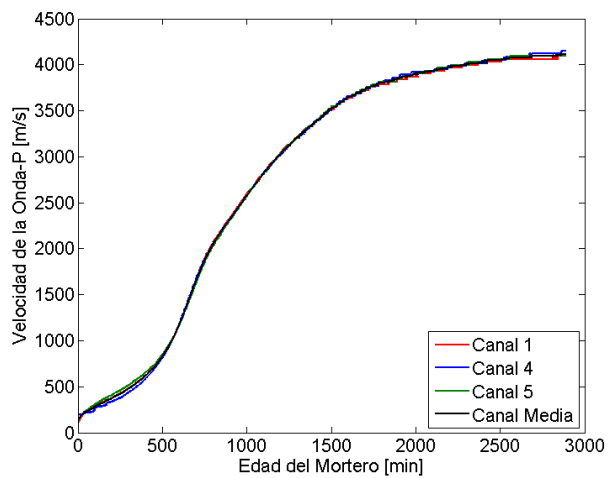


Mezcla 0.70%

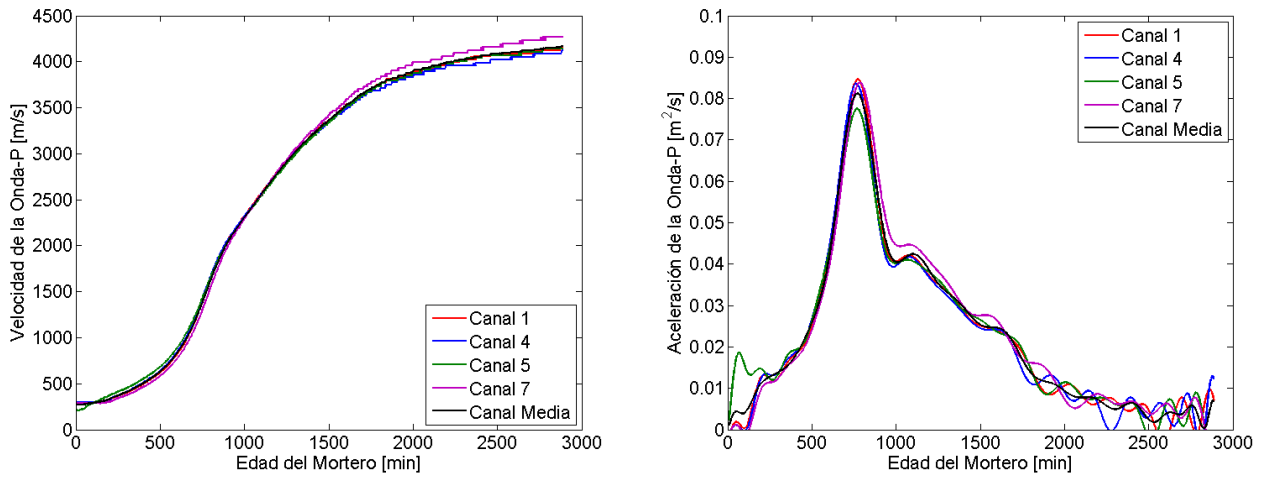


Mezcla 0.80%



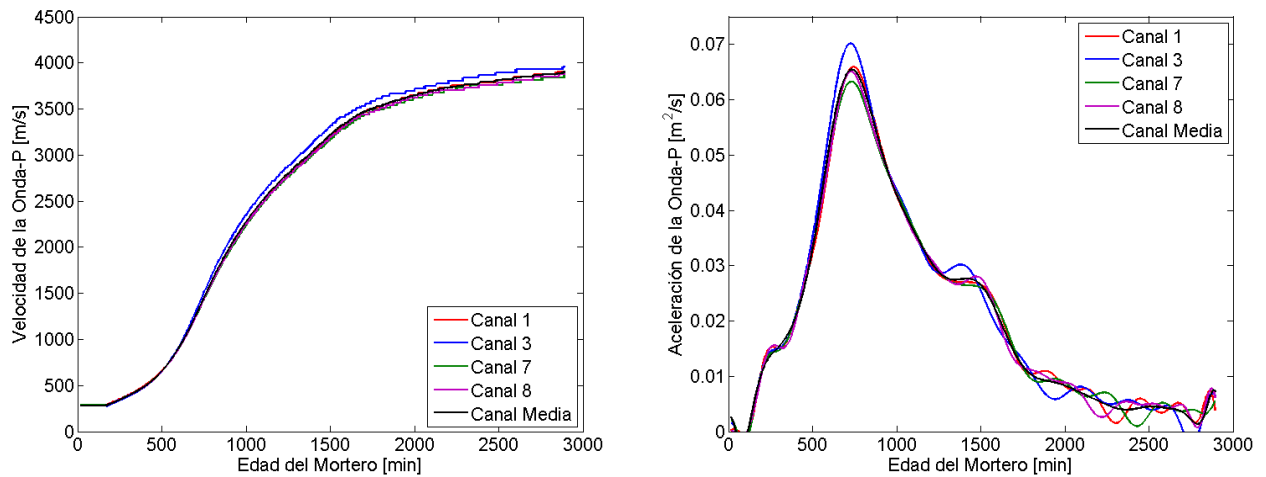
Mezcla 0.90%Mezcla 1.00%

Mezcla 1.10%

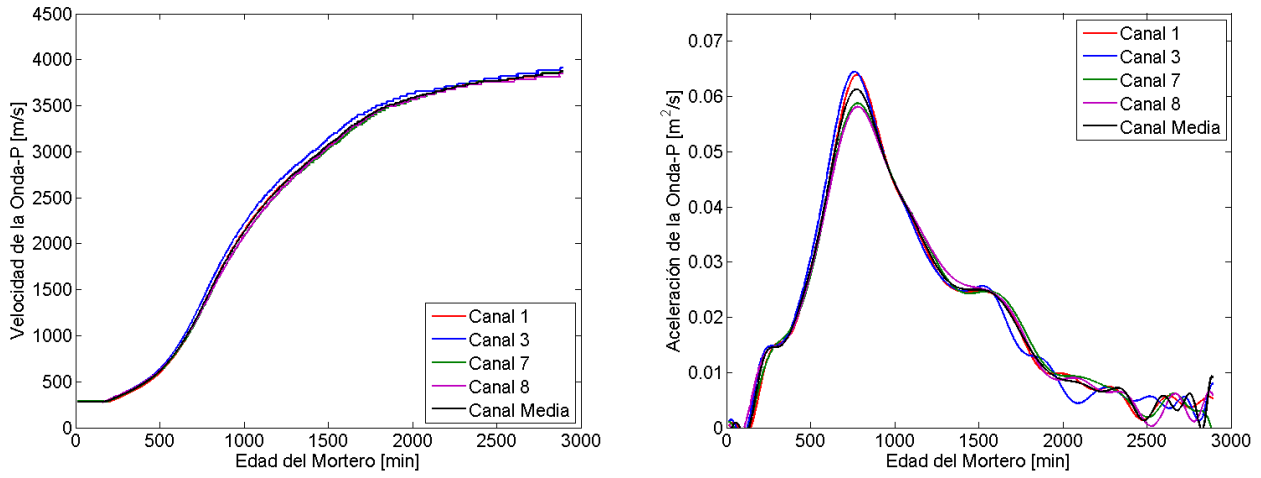


Serie 4-1

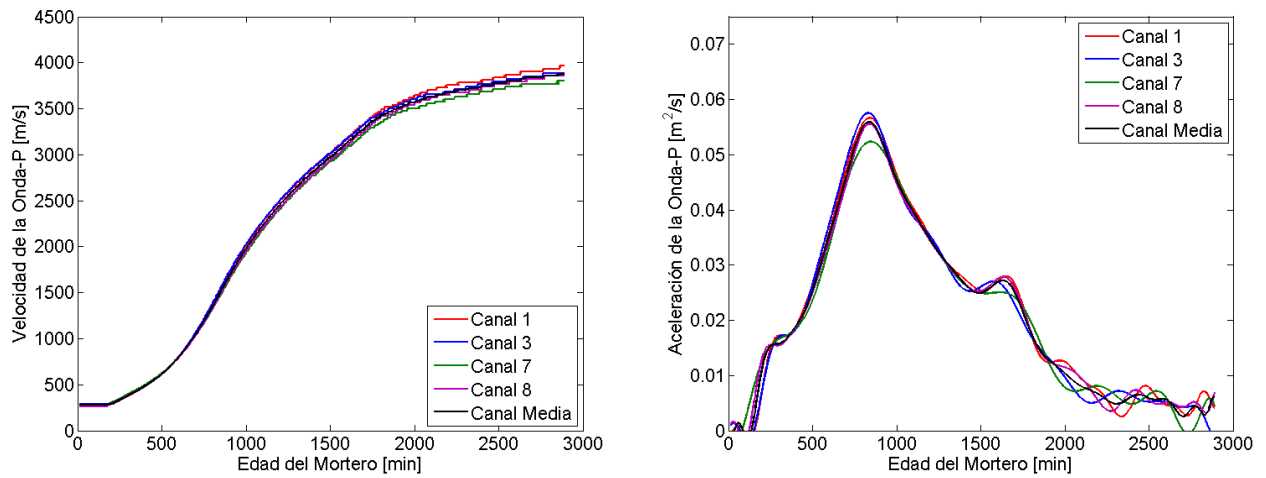
Mezcla 0.80%



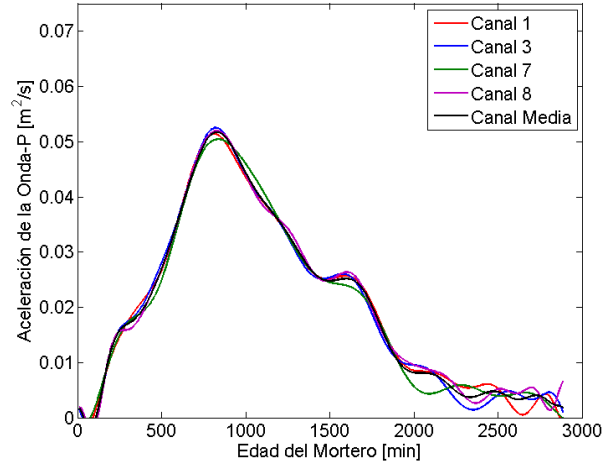
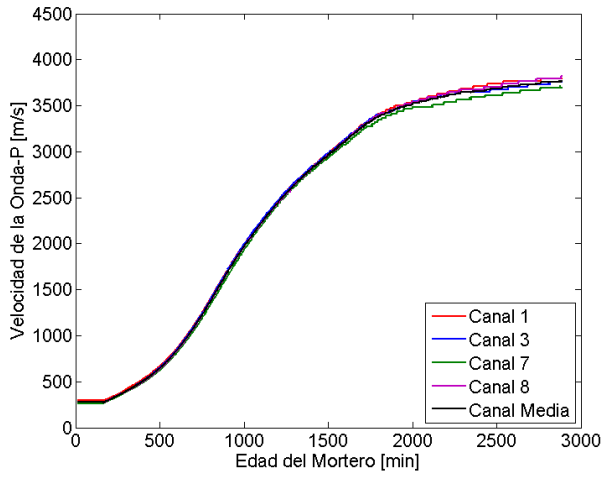
Mezcla 1.00%



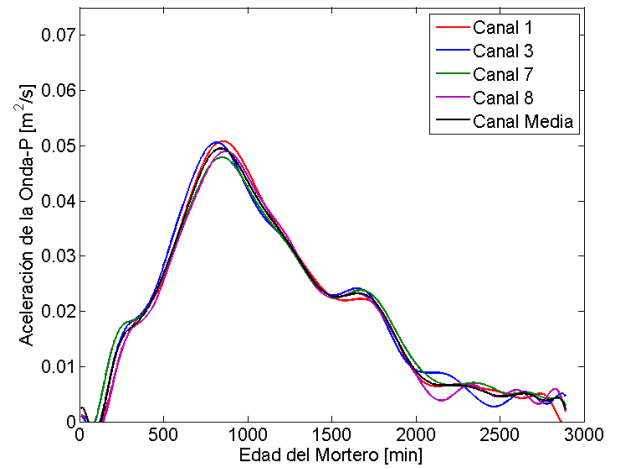
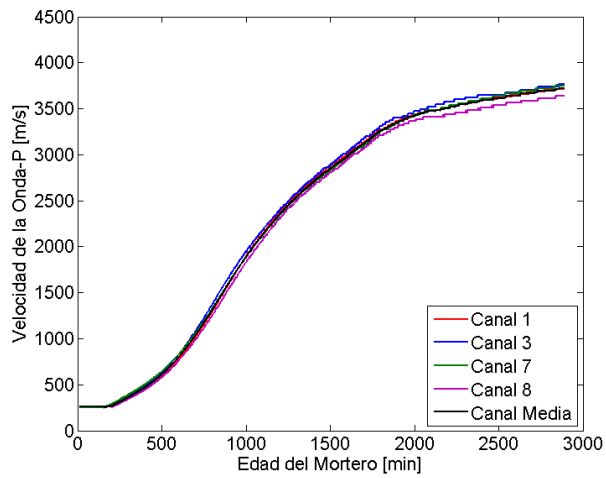
Mezcla 1.20%



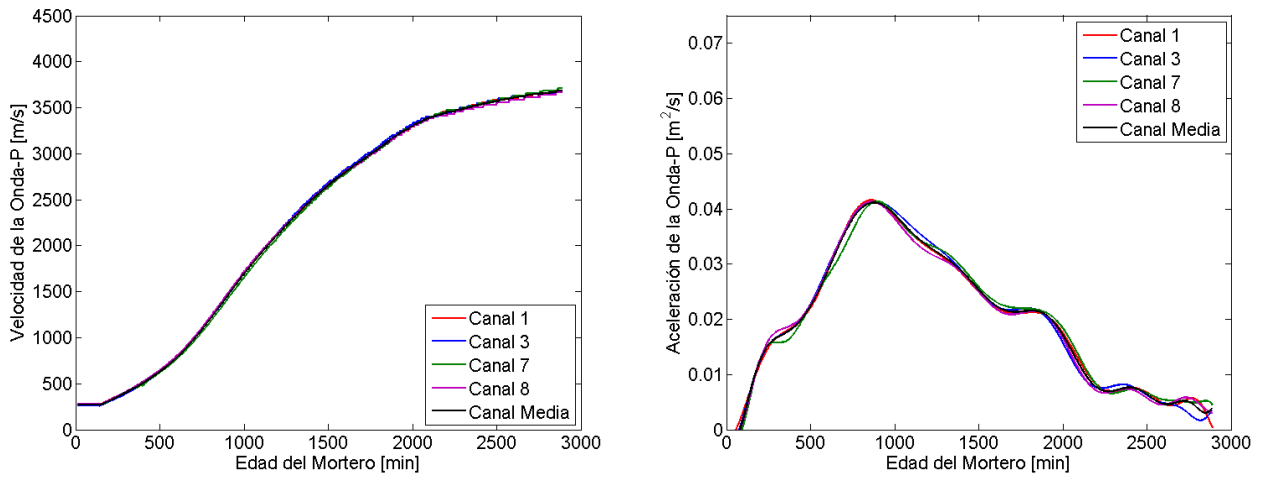
Mezcla 1.40%



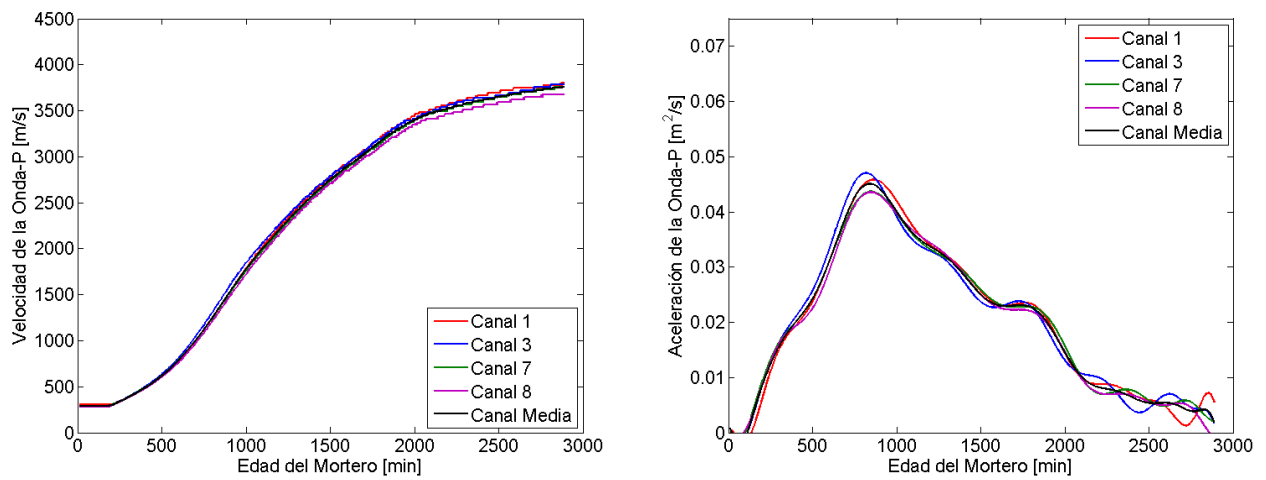
Mezcla 1.60%



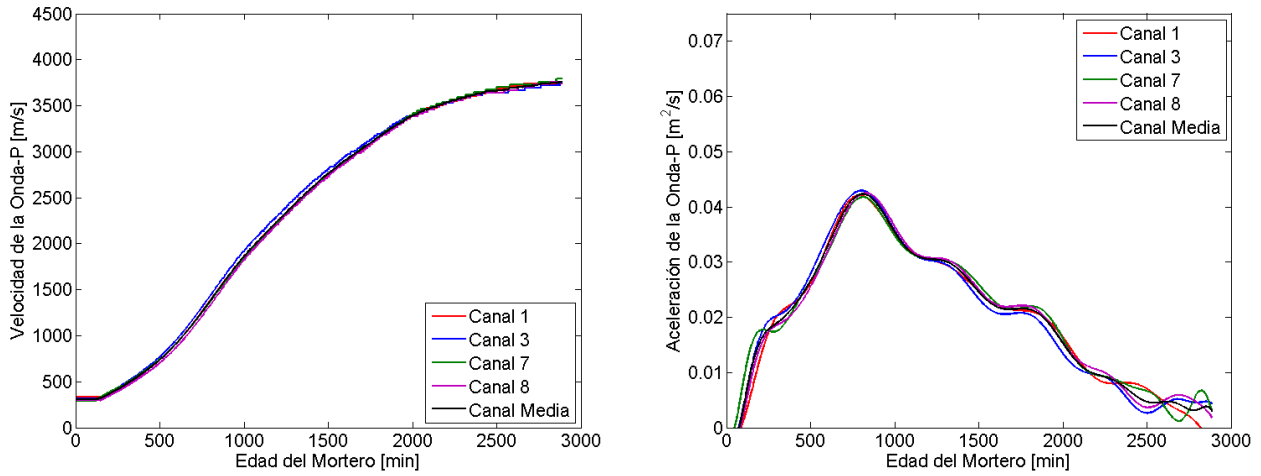
Mezcla 1.80%



Mezcla 2.00%

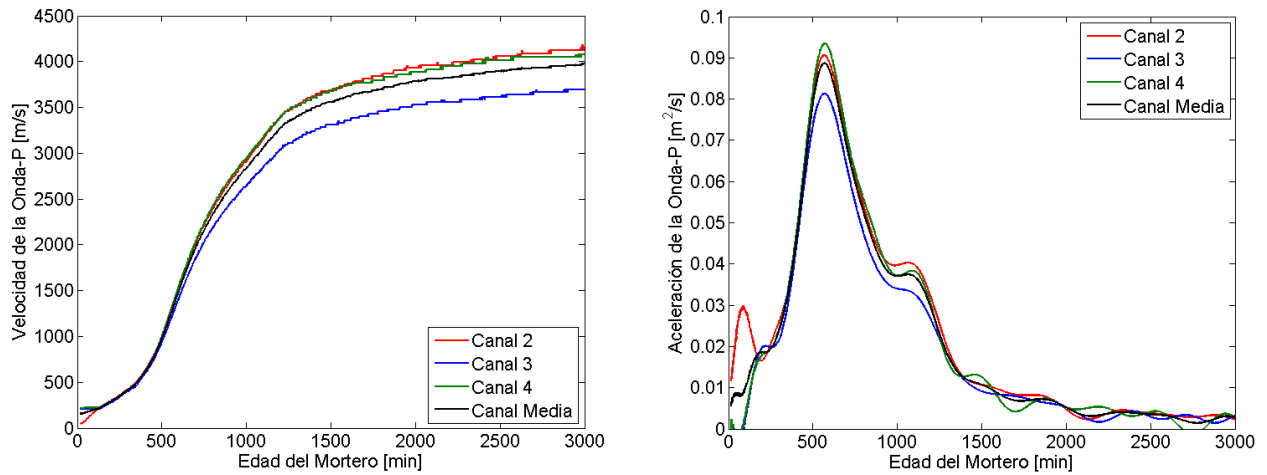


Mezcla 2.20%

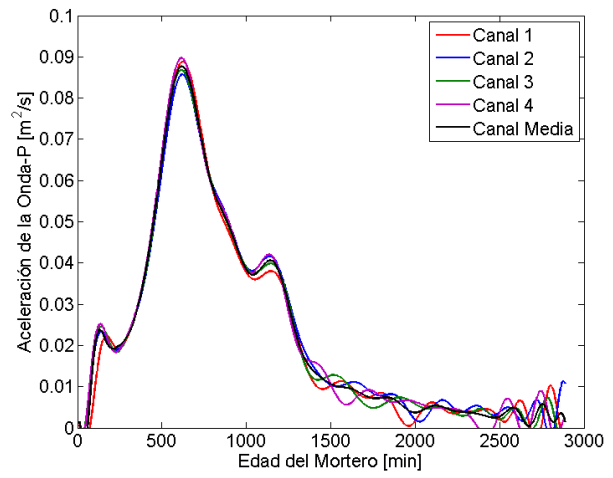
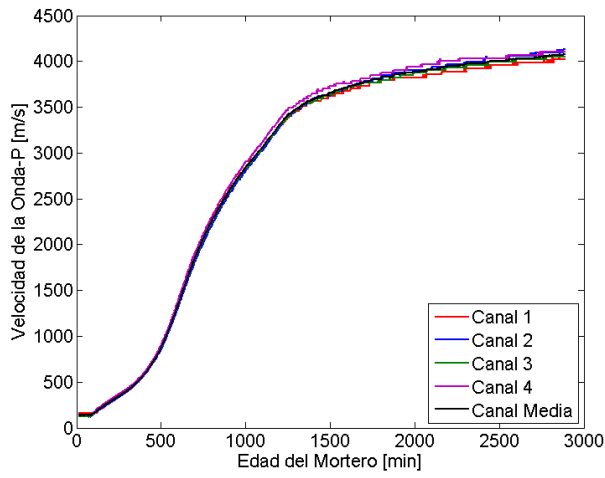


Serie 4-2

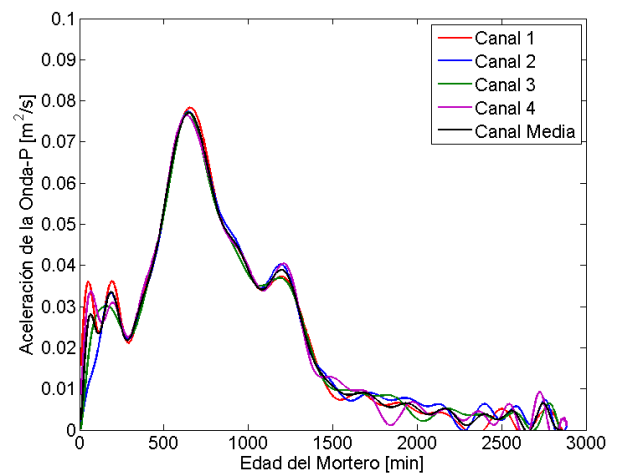
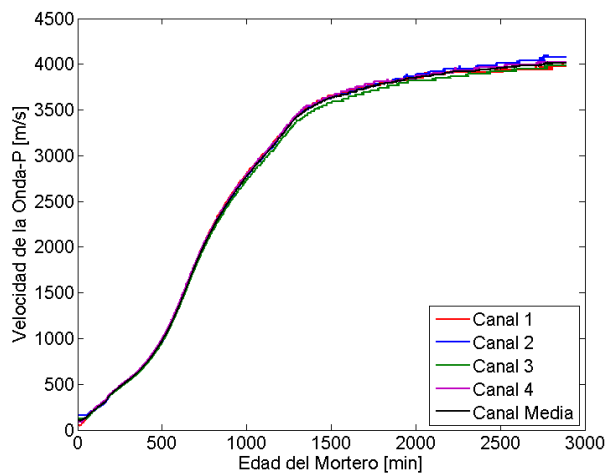
Mezcla 0.80%

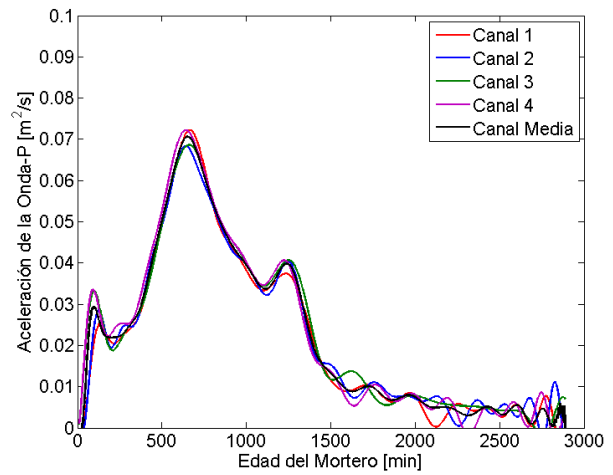
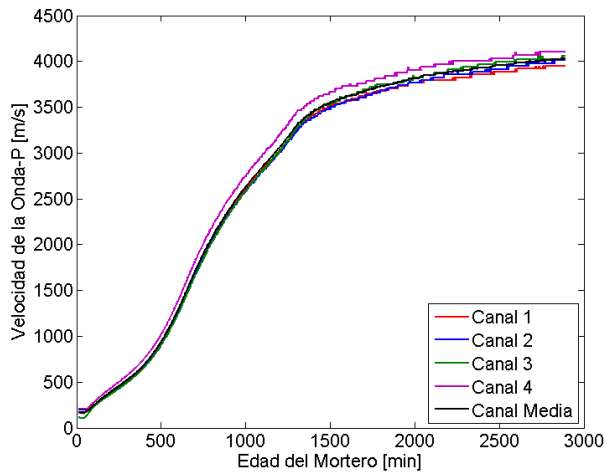
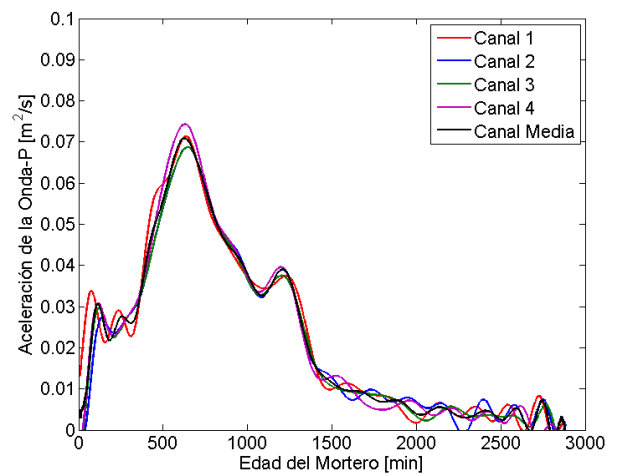
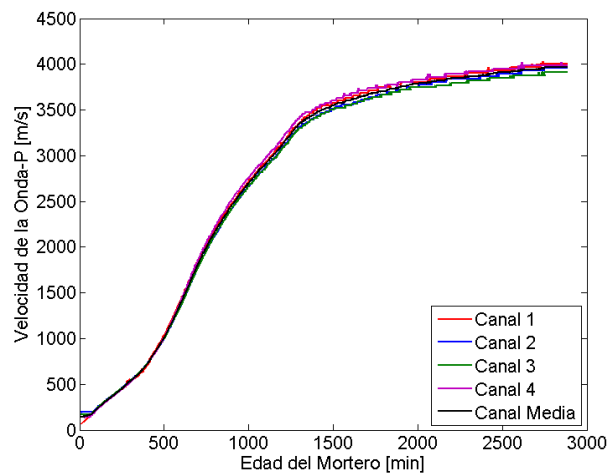


Mezcla 1.00%

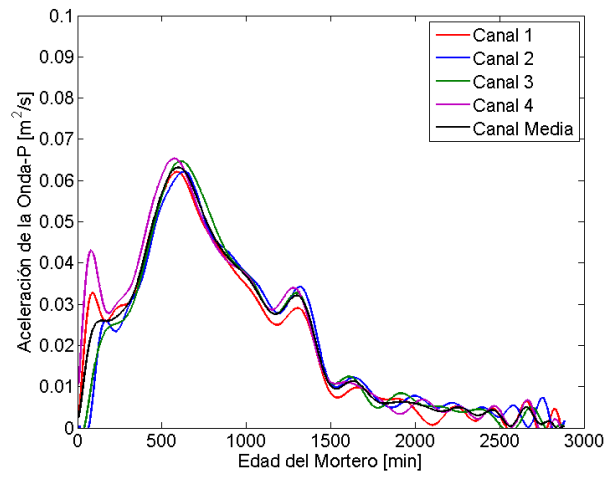
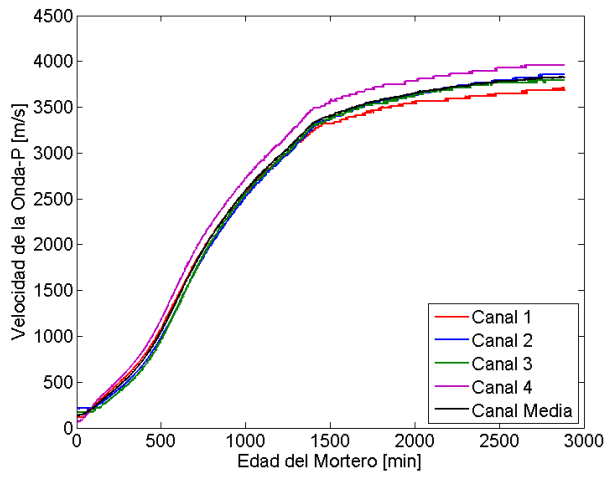


Mezcla 1.20%

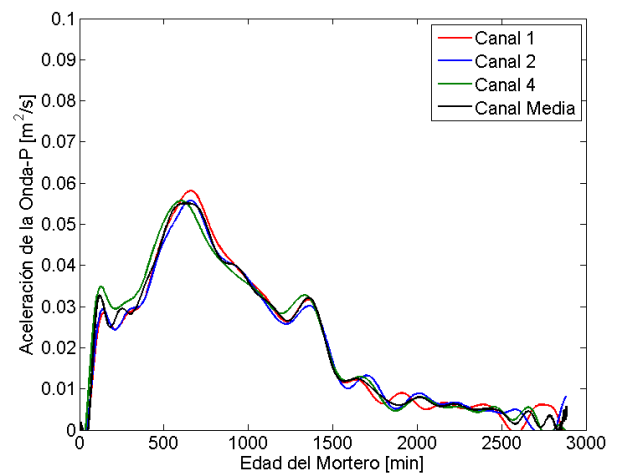
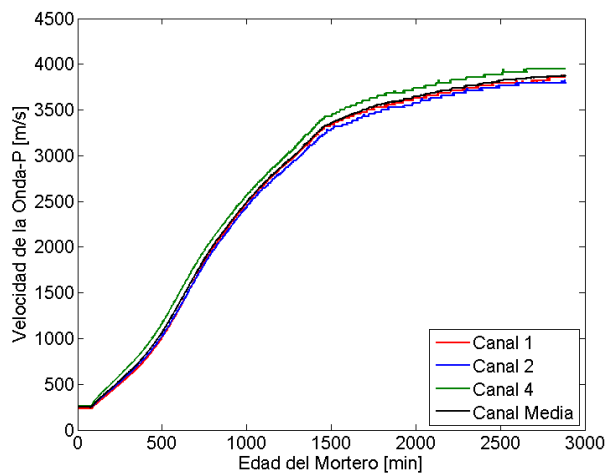


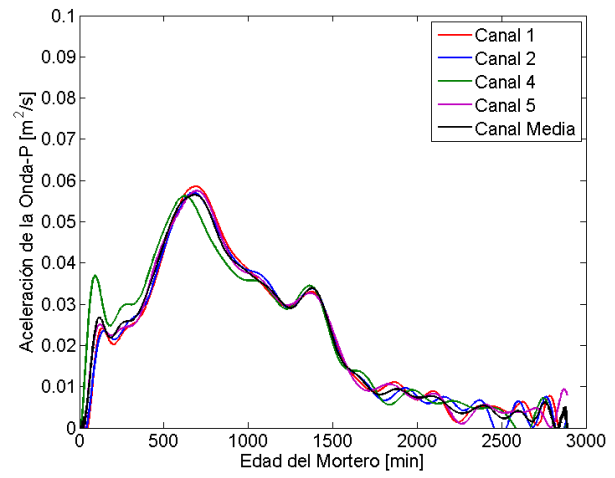
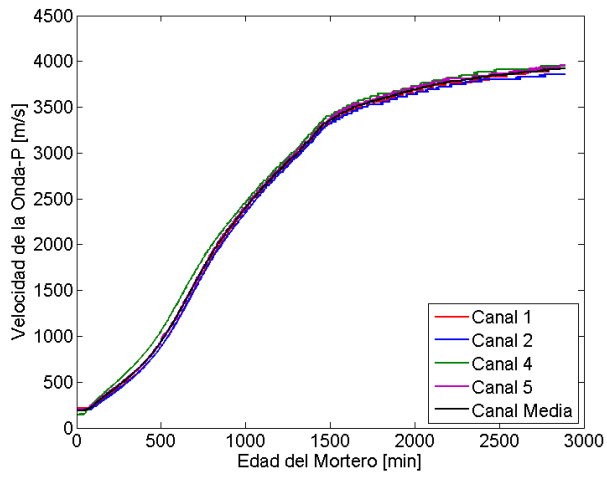
Mezcla 1.40%Mezcla 1.60%

Mezcla 1.80%



Mezcla 2.00%



Mezcla 2.20%



Anexo B: resultados de los ensayos SF y FT

Serie 1

	Medida 1 [mm]				Medida 2 [mm]				Medida 3 [mm]				Media [mm]	
C/P	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT
0.662	100	100	153	150	100	100	143	140	X	X	X	X	100	147
0.682	100	100	190	191	100	100	161	163	100	100	143	144	100	165
0.703	168	179	243	244	136	120	192	176	100	100	164	176	134	199
0.726	187	192	238	233	192	201	240	250	180	174	209	216	188	231
0.750	249	252	281	276	229	242	270	262	185	183	221	222	223	255
0.776	267	271	290	296	262	257	284	289	257	259	281	285	262	288
0.804	276	270	288	292	274	270	286	295	270	262	288	275	270	287
0.833	282	281	290	300	274	284	290	298	X	X	X	X	280	295
0.865	278	285	300	300	274	276	290	300	X	X	X	X	278	298

Serie 2

	Medida 1 [mm]				Medida 2 [mm]				Media [mm]	
C/P	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT
0.643	100	100	128	129	100	100	128	131	100	129
0.667	150	125	234	191	148	148	206	210	143	210
0.692	180	190	240	244	190	195	241	236	189	240
0.720	236	230	265	270	245	235	271	280	237	272
0.750	273	267	295	298	256	266	275	272	266	285
0.783	264	257	288	290	260	254	272	283	259	283
0.818	262	275	262	275	263	272	285	295	268	290
0.857	253	258	273	280	257	268	272	281	259	277
0.900	270	275	297	294	263	266	280	281	269	288

**Serie 3**

	Medida 1 [mm]				Medida 2 [mm]				Medida 3 [mm]				Media [mm]	
% SP G51	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT
0.40	100	100	131	135	100	100	131	128	100	100	126	125	100	129
0.50	100	100	145	147	100	100	146	149	100	100	134	134	100	143
0.55	100	100	157	157	100	100	148	150	100	100	151	152	100	153
0.60	161	165	205	207	218	220	248	252	196	190	223	222	192	226
0.65	260	266	277	280	255	264	272	278	256	258	282	284	260	279
0.70	278	280	300	300	280	283	300	300	280	279	300	300	280	300
0.80	295	300	300	300	300	300	300	300	277	279	290	292	292	300
0.90	290	295	300	300	300	300	300	300	281	282	300	300	291	300
1.00	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	294	300
1.10	300	300	300	300	295	300	300	300	284	286	300	300	300	300

Serie 4

	Medida 1 [mm]				Medida 2 [mm]				Medida 3 [mm]				Media [mm]	
% SP G27	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT	SF	FT
0.80	100	100	127	128	100	100	127	125	102	102	135	137	100	127
1.00	100	100	144	143	100	100	147	146	106	105	154	155	100	145
1.20	100	100	163	165	100	100	161	159	100	100	164	166	100	163
1.40	101	104	176	186	102	100	186	191	108	110	183	186	104	185
1.60	157	158	221	220	160	157	218	218	145	142	215	216	153	218
1.80	200	191	245	240	172	171	222	224	190	192	248	247	186	238
2.00	214	217	246	248	209	214	250	248	219	221	263	265	216	253
2.20	247	248	268	267	238	240	257	258	260	261	281	282	249	269